

THÈSE

présentée à

LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANTES

pour l'obtention

du DOCTORAT es SCIENCES NATURELLES

par

Alain P. GROVEL

DOCTEUR 3ème CYCLE

Sujet de la thèse : **ÉTUDE D'UN ESTUAIRE**

DANS SON ENVIRONNEMENT

LE BLAVET MARITIME ET LA REGION DE LORIENT

TOME I

Soutenue le 28 Novembre 1970, devant la Commission composée de :

M. F. OTTMANN *Professeur, Nantes*

Président

M. P. CAVET *Professeur, Nantes*

M. J. LE FLOCH *Professeur, Rennes*

M. L. BERTHOIS *Professeur, Rennes*

Examineurs

M. J. CHAPON *Directeur des Ports Maritimes*

M. J. LARRAS *Inspecteur Général des Ponts et Chaussées*

Membres invités

THÈSE

présentée à

LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANTES

pour l'obtention

du DOCTORAT es SCIENCES NATURELLES

par

Alain P. GROVEL

DOCTEUR 3ème CYCLE

**Sujet de la thèse : ÉTUDE D'UN ESTUAIRE
DANS SON ENVIRONNEMENT**

Le Blavet maritime et la région de Lorient

TOME I

Soutenue le 28 Novembre 1970, devant la Commission composée de :

M. F. OTTMANN *Professeur, Nantes*

Président

M. P. CAVET *Professeur, Nantes*

M. J. LE FLOCH *Professeur, Rennes*

M. L. BERTHOIS *Professeur, Rennes*

Examineurs

M. J. CHAPON *Directeur des Ports Maritimes*

M. J. LARRAS *Inspecteur Général des Ponts et Chaussées*

Membres invités

THÈSE

présentée à

LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANTES

par

le DOCTEUR EN SCIENCES NATURELLES

et

MAÎTRE AGRÈGÉ

DE LA FACULTÉ

Sujet de la thèse : ÉTUDE D'UN ESTUAIRE

DANS SON ENVIRONNEMENT

Le jury composé de :



TOME I

Le manuscrit a été déposé le 20 Mars 1972, sous le N° 2457, à la Faculté des Sciences de Nantes.

Président

M. F. OTTANGE

M. F. LAVET

M. J. LE FLAICH

M. J. BERTHOUD

Examinateur

M. J. CHIRAC

M. J. LANGE

FACULTE DES SCIENCES

Président du Conseil Transitoire de Gestion,

Chargé des fonctions de Doyen M. AVIGNON

Physique

Professeurs

M. PAUC

Mathématiques

M. RAFFIN

Mécanique rationnelle

M. GARRIGUES

Biologie végétale

M. BRILLOUET

Analyse numérique

M. DUNOYER de SEGONZAC

Chimie

M. GRAFF

Chimie

M. COLLET

Physique

M. BOULLLOUD (C.S.U.)

Physique

Mlle DEBRAUX

Botanique

M. PETRESCO

Mathématiques

M. PIERI

Biologie animale

M. WOJTKOWIAK

Chimie

M. MOLINARO

Mathématiques

M. SELLIER

Zoologie

M. LE DOUARIN

Biologie

M. MOUTON

Physique

M. MINN

Physique

Professeurs sans chaire

M. CAVET

Sciences de la Terre

M. OTTMANN

Sciences de la Terre

M. DUPONT

Biologie végétale

M. ROUXEL

Chimie

M. QUINIOU

Chimie

M. LASKAR

Physique

M. GOUREAUX

Physique

M. MARTIN

Chimie

M. SAUDRAY

Biologie animale

Maîtres de Conférences

M. FORESTIER

Sciences de la Terre

M. NICOLAS

Sciences de la Terre

Mme LE DOUARIN

Biologie végétale

M. TOURNOUX

Chimie minérale

M. AMOURIQ

Psychophysiologie

Mlle ASTIE (C.S.U.)

Botanique

M. GOUIN (C.S.U.)	Chimie
M. BARDON	Physique
M. REMY (C.S.U.)	Chimie
M. CHABANNEL	Chimie
M. LONCKE	Physique
M. FOUQUES	Mathématiques
M. LEYCURAS (C.S.U.)	Physique
Mme MARTIN	Chimie
M. LEBRUN	Biologie
M. MATZ (C.S.U.)	Biologie
M. LEBORGNE	Mathématiques
M. LE BIHAN	Physique
M. IBISCH	Mathématiques
Mme NICOLAS	Biologie
M. ROSIER	Physique

Secrétaire de la Faculté

M. PAILLET

Attaché Principal

□

En souvenir de ma Mère,

à ma Femme,

à mon Père.

SOMMAIRE

1	CADRE GENERAL DE L'ETUDE	1
	1-1 Position du problème.	2
	I-2 Cadre géographique général.	2
	I-3 Cadre géologique et morphologique.	4
	I-4 Conduite de l'étude.	7
2	LA CIRCULATION LITTORALE	8
	2-1 Position du problème.	9
	2-2 Courants de surface.	15
	2-3 Courants de fond.	36
	2-4 Champ vertical des courants.	42
	2-5 Mesures complémentaires.	47
	2-6 Conclusion.	50

3	ETUDE DES HOULES A LA COTE	52
	3-1 Introduction - Mesures.	53
	3-2 Description des résultats - Analyse statistique.	56
	3-3 Rattachement de la houle mesurée à la houle du large.	67
	3-4 Corrélations Houle - Météorologie.	77
	3-5 Estimation d'un clapotis d'estuaire.	85
	3-6 Conclusion.	85
4	LES COURANTS DE BAS-ESTUAIRE	87
	4-1 Introduction.	88
	4-2 Etudes antérieures.	90
	4-3 Mesures 1964-1968.	93
	4-4 Conclusion.	99
5	L'ESTUAIRE DU BLAVET	100
	5-1 Position du problème.	101
	5-2 Mesures hydrologiques.	105
	5-3 Description de la circulation et de la diffusion	108
	5-4 Etude théorique de la lentille dans l'hypothèse de convection par gravité.	125
	5-5 Conclusion.	139

6	LES APPORTS FLUVIAUX	141
6-1	Régime du Blavet et du Scorff.	142
6-2	Le contexte physique du bassin versant.	147
6-3	Synthèse climatologique.	149
6-4	Conclusion.	153
7	SEDIMENTOLOGIE	154
7-1	Introduction.	155
7-2	Les régions sédimentologiques.	155
7-3	Les constituants de la vase.	158
7-4	La texture.	184
7-5	Conclusion.	193
8	LA DYNAMIQUE DES SEDIMENTS- BILAN SEDIMENTAIRE	195
8-1	Position du problème.	196
8-2	Les déplacements de sédiments dans la zone estuarienne.	196
8-3	Les déplacements actuels de sédiments	214
8-4	Renseignements fournis par les traces biologiques.	225
8-5	L'histoire de la sédimentation.	231
8-6	Conclusion.	234
	CONCLUSION	239

AVANT-PROPOS

En Novembre 1963, je revenais du Service Militaire et ne pouvais plus retourner à ALGER ... Je me fis alors muter à la toute jeune Faculté des Sciences de NANTES qui venait d'être créée et fonctionnait dans deux baraques en bois ! Tout frais émoulu de mon Doctorat 3ème cycle, je cherchais un sujet de thèse d'Etat compatible avec les moyens disponibles. Pour cela, je demandais aux Ingénieurs des divers Arrondissements Maritimes des PONTS & CHAUSSEES les renseignements en leur possession concernant le recul de leurs côtes, les débits de leurs fleuves ...

L'Ingénieur d'Arrondissement du MORBIHAN, contacté par téléphone, me fit préciser le but de mes questions, puis bondit : "Vous me demandez des renseignements ! Mais, c'est vous qui devriez m'en fournir ! Venez me voir, j'ai besoin de vous". J'allai donc le voir ... et ce fut le début de la thèse présentée ici.

Cette thèse est une monographie locale sur l'Estuaire du BLAVET et le littoral de la région lorientaise.

Elle fait, par conséquent, intervenir plusieurs disciplines différentes : la Géologie, la Sédimentologie, l'Océanographie littorale, la Dynamique estuarienne, non sous l'angle théorique de chacune d'elles mais par leurs mutuelles relations dans cette grande discipline qu'est la Science de l'Environnement.

Plus qu'une analyse fouillée des phénomènes, c'est une étude de leurs corrélations qui est envisagée ici. J'ai, d'autre part, plus particulièrement insisté sur l'obtention de valeurs maximales dans une optique d'utilisateur.

Je forme donc le voeu que cette thèse qui doit tant à la collaboration entre Ingénieurs et Universitaires, puisse, en retour, être utile à l'ingénieur chargé d'aborder les problèmes d'aménagement portuaire et littoral.

REMERCIEMENTS

Ce travail, en collaboration avec les PONTS & CHAUSSEES, entrepris dans un laboratoire qui venait tout juste d'être créé, n'aurait jamais été possible si je n'avais eu comme Directeur de thèse Monsieur le Professeur F. OTTMANN. Le sujet lui plaît. Son esprit de lutteur, passionné par l'ouverture de l'Université sur le monde extérieur, trouvait là un champ d'action supplémentaire. Malgré le dénuement extrême qui caractérisait le Laboratoire de Géologie Marine à cette époque, je l'ai toujours vu s'ingénier à me procurer les moyens de travail nécessaires, tant au point de vue matériel que documentation. Cette aide fut toujours assortie d'une direction respectant l'enthousiasme et la liberté, et plus confiante dans le résultat final que je ne le fus jamais moi-même.

Pour toutes ces années de soucis et de labeurs, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de ce Jury, qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude.

Qu'il me soit permis également d'exprimer ma très vive reconnaissance à Monsieur le Professeur CAVET qui ne m'a jamais ménagé, ni ses encouragements, ni ses démarches dans les moments difficiles, et dont la perfection du style scientifique fut toujours pour moi, un modèle ... hélas, jamais égalé.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Monsieur le Professeur LE FLOC'H qui a bien voulu venir en ami, de l'Université voisine, me guider dans mes interprétations dynamiques et apporter dans ce Jury sa compétence en matière d'estuaires et de courants de fond.

Monsieur le Professeur BERTHOIS m'hébergea pendant près d'une année dans son Laboratoire à RENNES, en attendant la construction du Laboratoire de NANTES, et j'y appris toutes les techniques de la sédimentologie, ce qui est beaucoup, mais aussi tous les principes de la méthode expérimentale, ce qui est inestimable.

C'est sous son autorité bienveillante que naquit ma passion pour la dynamique estuarienne et son aide distribuée sans compter me permit de faire mes premiers pas dans ce domaine. Qu'il veuille bien recevoir ici l'hommage de ma profonde reconnaissance.

Monsieur J. CHAPON, Directeur des Ports maritimes a bien voulu, malgré ses très nombreuses tâches actuelles, me faire l'honneur de participer au Jury, prouvant ainsi l'intérêt qu'il attache au développement des relations scientifiques avec l'Université. Je le prie de bien vouloir accepter ici l'expression de ma plus respectueuse reconnaissance.

Monsieur l'Inspecteur Général des Ponts & Chaussées, J. LARRAS, dont les travaux de synthèse sur les problèmes côtiers et portuaires font autorité et auxquels je me suis tant de fois référé, a bien voulu se joindre au Jury pour lui apporter le fruit de sa longue expérience maritime. Qu'il veuille bien agréer, ici, mes remerciements les plus sincères.

Attaché de Recherche au CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE de 1964 à 1969, je remercie profondément cet organisme pour les diverses facilités qu'il m'a accordées.

A mon retour d'ALGERIE, fin 1963, mon transfert à NANTES fut réalisé grâce aux bons soins de MM. les Professeurs R. LAFITTE et Y. GOURINARD et j'éprouve un grand plaisir à les en remercier ici.

De même, je remercie Messieurs les Professeurs F.H. FORESTIER et A. NICOLAS, du Laboratoire de Géologie de NANTES, auprès desquels j'ai toujours trouvé une aide compréhensive et empressée.

Monsieur le Professeur LACOMBE n'a jamais cessé de me prodiguer son aide et ses conseils, durant mon stage dans son Laboratoire d'abord, puis à chacun des grands tournants de ma vie scientifique ; qu'il en soit remercié ici.

Ce travail n'aurait jamais pu être mené à bien sans la collaboration active du Service Départemental de l'Equipeement du MORBIHAN.

Qu'il me soit permis d'exprimer ici ma très vive reconnaissance aux Ingénieurs de l'Arrondissement Maritime du MORBIHAN qui se succédèrent sous la direction bienveillante de Monsieur l'Ingénieur en Chef GALARD:

Monsieur SAVEL avec qui furent noués les premiers liens,
Monsieur QUEAU, dont le séjour fut trop bref,
Monsieur SAURY, qui sut donner à cette collaboration son maximum d'efficacité.

Combien je sais gré à Messieurs CHEREL et RUZ, Ingénieurs T.P.E., de m'avoir fourni, à des titres différents, des moyens de travail considérables, influençant ainsi grandement ma vie professionnelle.

D'autre part, je tiens à exprimer ma gratitude toute particulière à Madame J. QUERE, Directeur du Laboratoire Départemental d'Hygiène à NANTES, avec qui j'ai eu une amicale collaboration pour l'étude de la pollution des eaux.

En outre, ma tâche fut grandement facilitée par l'accueil très cordial que je reçus toujours au Service Hydrographique, auprès de Monsieur l'Ingénieur en Chef BOURGOIN Chef du Secrétariat Permanent du C.O.E.C., et de Monsieur l'Ingénieur en Chef PELUCHON, alors Directeur du Service "Marée-Géophysique". Je les remercie bien vivement d'avoir toujours été pour moi deux guides aussi agréables que compétents dans le dédale de la recherche de l'information.

C'est à Monsieur GRASSY, Directeur du SIG, à son esprit de recherche et de collaboration, que je dois d'avoir pu utiliser cette méthode si fructueuse qu'est la sismique réflexion continue marine. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de mes remerciements les plus cordiaux.

J'ai pu recueillir auprès de Monsieur FANENE Chef de la Station Météorologique de LANN-BIHOUE, toutes les informations qui furent nécessaires à mon travail, documentation ou prévisions, et je l'en remercie bien sincèrement.

Monsieur CHARPENTIER, Ingénieur Responsable de la 3ème Circonscription Electrique, a bien voulu me communiquer tous les résultats de jaugeages et je lui en exprime toute ma gratitude.

Pour les travaux à la mer, j'ai dû faire appel à des bateaux importants et je remercie ici les patrons et équipages du "POINT D'INTERROGATION", "JOB-HA-ZELIAN" baliseur "ROI GRADLON" et vedette des Ponts & Chaussées , "LOGODEN", pinasse "ARMORIQUE".

J'associerai à ces remerciements tous mes collègues du Laboratoire de Géologie de NANTES qui ont souvent pris sur leur temps et leur peine pour m'apporter leur concours : Messieurs L. BARBAROUX et R. BROSSE, Maîtres-Assistants, Y. DELANOE et A. DIEUCHO, Assistants, Y. ALIX, D. GOULEAU et Ph. JALLADEAU, chercheurs

Je sais gré à Monsieur J.P. MARGEREL, Maître-Assistant et à Monsieur H. LARDEUX, Chargé de Recherche, d'avoir bien voulu me faire bénéficier de leurs précieux conseils.

Même après mon départ du Laboratoire de Géologie de l'E.N.S.A.R., je gardai des liens de travail et d'amitié avec Monsieur Gérard AUFFRET, Assistant, et je lui dois beaucoup.

Il m'est agréable de remercier ici les techniciens du Service d'analyse du Laboratoire de Géologie Marine de NANTES : Mesdames N. MARGEREL, C. DERVAL, L. CLOUET, et Monsieur G. LAVAUX.

Messieurs CHAIGNAUD Père et Fils n'ont jamais ménagé leur peine, et leur aide sur le terrain fut donnée sans compter.

L'important travail de dactylographie fut confié à Mesdames M. MAURY et G. ESNAUD et je suis heureux de les remercier.

Je remercie également Mmes M. MARCHAIS, D. ROCHER, M. LE GALLO pour leur travail de présentation.

C'est enfin au talent au zèle de tout le personnel de l'Imprimerie, MM. J. BILLARD, R. DORLET, B. HOUGRON, A. REDOR, sous l'autorité bienveillante de Monsieur PAILLET, Secrétaire de Faculté, que je dois le bon agencement de ce Mémoire.

Que tous recoivent ici l'expression de ma reconnaissance.

CHAPITRE I

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Position du problème.

Cadre géographique général.

Cadre géologique et morphologique.

Conduite de l'étude.

1 - 1. Position du problème

Le travail présenté ici n'a nullement l'ambition d'être la synthèse de tous les résultats concernant un estuaire et le littoral avoisinant. Tout ce qui traite de biologie et de zoologie a notamment été volontairement omis.

Le but de cette étude est de constituer un outil de travail pour l'ingénieur désireux d'aménager sa région et ne disposant pour cela que de renseignements fragmentaires.

Un estuaire étant le plus souvent une zone portuaire, l'accent a été mis sur la liaison entre l'océanographie et la sédimentologie. La géologie traditionnelle n'est alors considérée que du point de vue de l'utilisateur ; c'est un point de départ pour la sédimentologie dynamique. Quant à l'hydrologie elle a été limitée à l'étude des interactions air-eau.

1 - 2. Cadre géographique général (voir carte 1-1)

La région étudiée se situe sur la côte atlantique, en Bretagne Sud, dans le département du Morbihan.

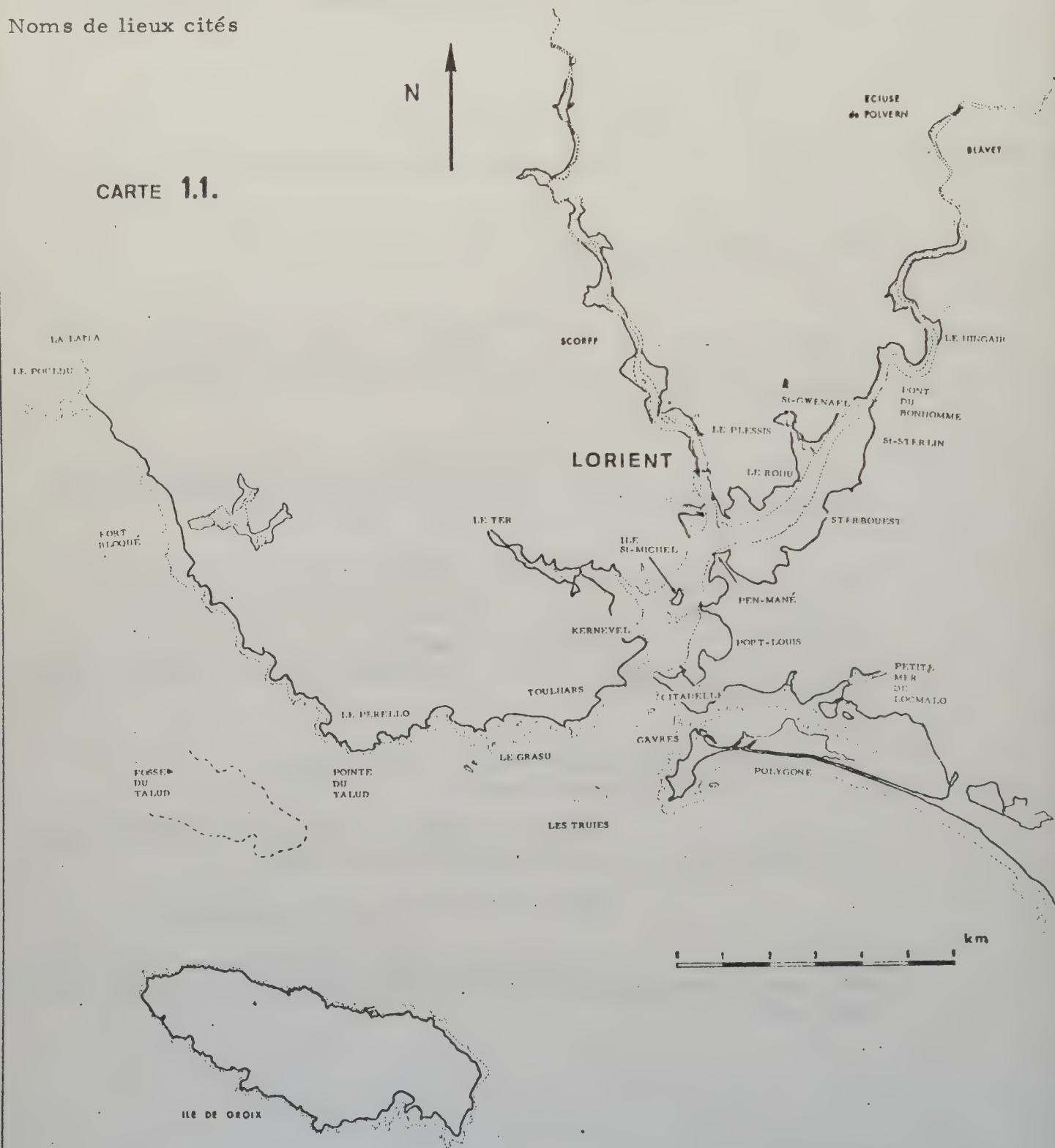
Elle peut se subdiviser en trois zones :

- une zone maritime comprise entre l'Ile de Groix et la côte (la distance entre l'Ile et la côte est de 6 km au point le plus rapproché).

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Noms de lieux cités

CARTE 1.1.



Cette zone intéresse les abords immédiats de l'embouchure d'un estuaire sur 10km de côte de part et d'autre de Port-Louis ; pour la compréhension de divers phénomènes, certaines mesures ont parfois débordé ce cadre étroit.

- une zone portuaire, c'est-à-dire très aménagée par l'homme, comprise entre Port-Louis au Sud et Lorient au Nord. C'est une zone allongée du Nord au Sud sur 4 kilomètres et très étroite (800 mètres à Locmiquelic).

Les caractéristiques géographiques essentielles de cette zone sont :

- l'étroitesse du goulet faisant communication avec la mer, 300m de large à la Citadelle de Port-Louis,

- la présence d'une île au centre de cette zone, l'île Saint-Michel,

- les embouchures d'une petite rivière, le Ter (barrée depuis peu) et de deux fleuves côtiers, le Scorff et le Blavet.

- une zone estuarienne. Pour des raisons pratiques, (présence de l'Arsenal Maritime dans le Scorff), seul le Blavet sera étudié. Cette zone est constituée par le cours maritime du Blavet depuis Pen Mané au Sud, jusqu'au barrage-écluse de Polvern au Nord d'Hennebont, soit sur une longueur de 13,5 km. (voir description détaillée au chapitre 5).

Le Pont du Bonhomme sera souvent cité dans l'exposé car il est placé à un accident topographique notoire : l'élargissement brutal de la vallée.

1 - 3. Cadre géologique et morphologique

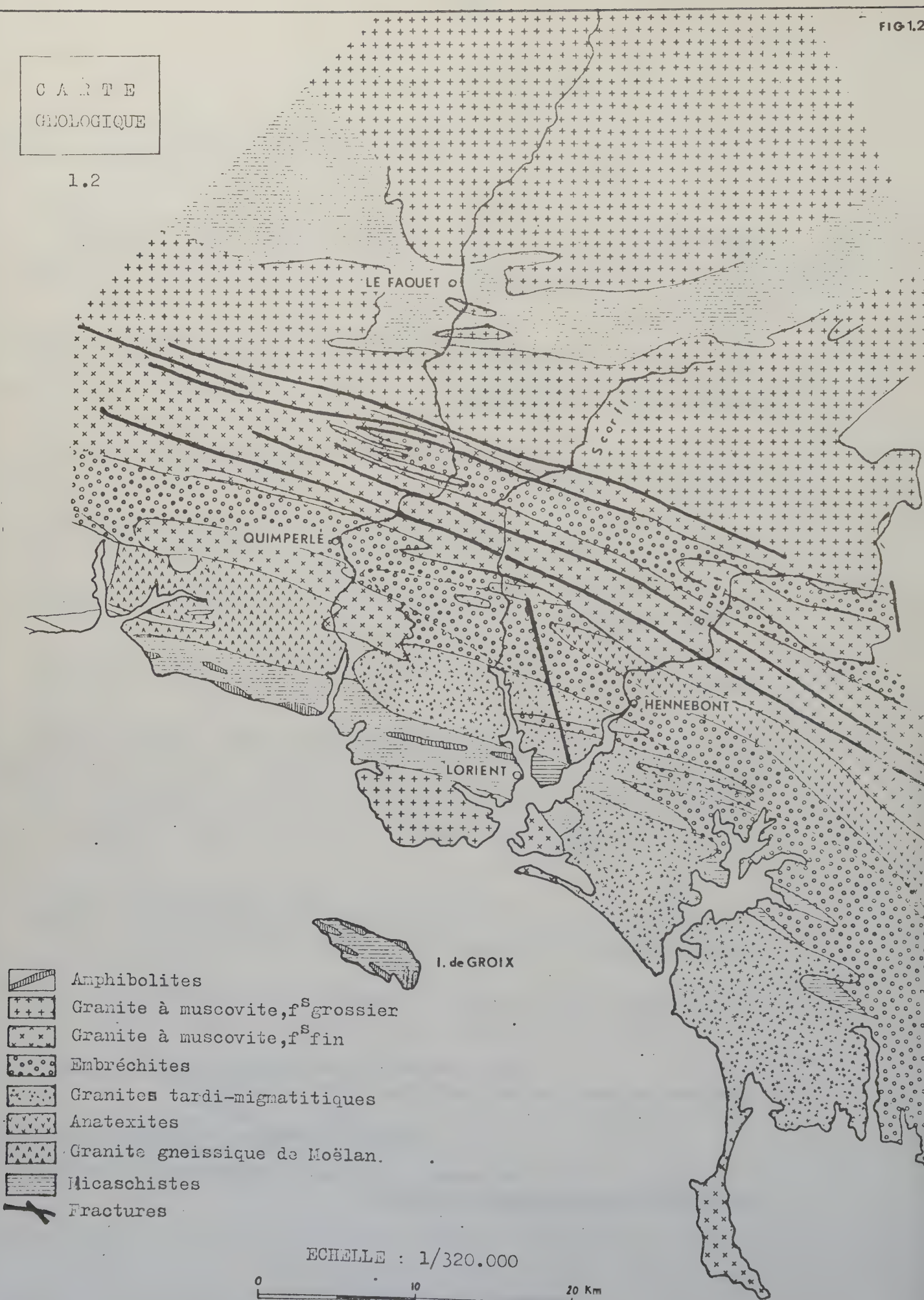
Du point de vue géologique, la région étudiée se situe sur le flanc Sud de l'anticlinal de Cornouaille.

1 - 3 - 1. Roches endogènes et cristallophyliennes

La carte 1.2. montre l'importance de ces formations dans les deux bassins versants.

CARTE
GEOLOGIQUE

1.2



Deux cycles orogéniques successifs ont plissé les terrains de cette région :

- un cycle orogénique primitif, de direction orogénique moyenne 90-105°, avec des phyllades briovériennes et des granites métagénétiques (granite gneissique de Lanvaux).

- un cycle orogénique hercynien, de direction orogénique moyenne 110-130° avec des ectinites (Groix), des magmatites et des granites intrusifs.

Les directions des fleuves sont en gros perpendiculaires aux lignes de plissement général. En fait, dans le détail, ils suivent des fractures secondaires. Les granites intrusifs sont du type à muscovite à faciès grossier (en massifs) ou à faciès fin syntectonique.

Dans les landes de Lanvaux, la granitisation est "caractérisée par un développement remarquable des feldspaths potassiques dans les micaschistes" (COGNÉ, 1960). Cette abondance de feldspaths potassiques se traduit dans les analyses chimiques par de très faibles teneurs en CaO :

D'après COGNÉ, 1960	Granite gneissique de Lanvaux	Micaschiste à 2 micas de Baud
SiO ₂	73,50	70,00
Al ₂ O ₃	13,86	12,46
Fe ₂ O ₃	0,90	2,38
FeO	1,14	3,29
MnO	0,01	0,08
MgO	0,50	2,01
CaO	0,75	0,80
Na ₂ O	2,65	1,80
K ₂ O	4,52	4,60
TiO ₂	0,10	0,70
P ₂ O ₅	0,70	0,30
H ₂ O ⁺	0,90	1,10
H ₂ O ⁻	0,10	0,10
	99,63	99,62

Cette pauvreté en plagioclases est un élément très intéressant pour un marquage d'apports éventuels.

1 - 3 - 2. Recouvrement sédimentaire récent

Ce sont le plus souvent des lambeaux.

Sur la plage du polygone Le Gâvres furent découverts des galets de calcaire Yprésien et Lutétien (COLLIN, 1921 et DANGEARD, 1924-1926). Ces étages ont été découverts en place à Kerdurand près de Port-Louis (S. DURAND, 1960). Ils sont surmontés par des sables et galets, attribués au Pliocène, recouvrant une vaste étendue entre le Blavet à l'Ouest et la rivière d'Etel à l'Est. Ces dépôts sont en falaise à Sterbouest, sur la rive gauche du Blavet et à Toulhars près de Kernevel sur la rive droite.

Enfin des plages "monastériennes" ont été signalées à Gâvres et à Fort Bloque (GUILCHER, 1948).

Par couverture sédimentaire on peut aussi entendre le cordon de dunes qui relie Gâvres à la Presqu'île de Quiberon.

1 - 4. Conduite de l'étude

Dans ce cadre, l'étude a été conduite à la façon des marins d'autrefois qui découvraient une terre inconnue. Ils explo- raient la mer cotière puis remontaient un estuaire, un fleuve.

Ce travail décrira donc d'abord au lecteur les conditions océanographiques littorales avant de s'enfoncer dans l'estuaire proprement dit.

CHAPITRE II

LA CIRCULATION LITTORALE

Position du problème.

Courants de surface.

Courants de fond.

Champ vertical des courants.

Mesures complémentaires.

Conclusion.

2 - 1 - Position du problème

La circulation littorale est définie ici comme une description des mouvements de masses d'eaux marines, auxquelles se mélangent les eaux d'un estuaire, au voisinage de son embouchure.

La limite de l'estuaire géographique étant très bien marquée sur la côte par un goulet, le domaine maritime étudié sera la zone comprise entre l'île de Groix et ce goulet (carte 2-1).

Cette zone peut être schématisée comme un plateau reliant la côte à Groix et recouvert de 20 à 25 mètres d'eau. Dans une entaille ouverte à l'Ouest, la Fosse du Talud, les profondeurs atteignent 40 mètres.

La connaissance des courants marins près de l'embouchure d'un estuaire est importante par son influence sur la circulation estuarienne proprement dite mais aussi par son action sur les transports de sédiments issus de l'estuaire.

Ces courants sont liés aux conditions locales des vents et de marée mais aussi à la circulation générale c'est-à-dire aux courants issus de zones océaniques plus vastes et plus lointaines.

En été, la circulation générale du Golfe de Gascogne peut être figurée dans les schémas suivants, tracés d'après la surface isotherme 11°C d'une part, et la topographie dynamique O/2000 décibars d'autre part (J. LE FLOCH, 1970).

CARTE DE SITUATION

des Observations antérieures (489, 490, 491) et des Stations citées dans le texte (ex. TA 30)

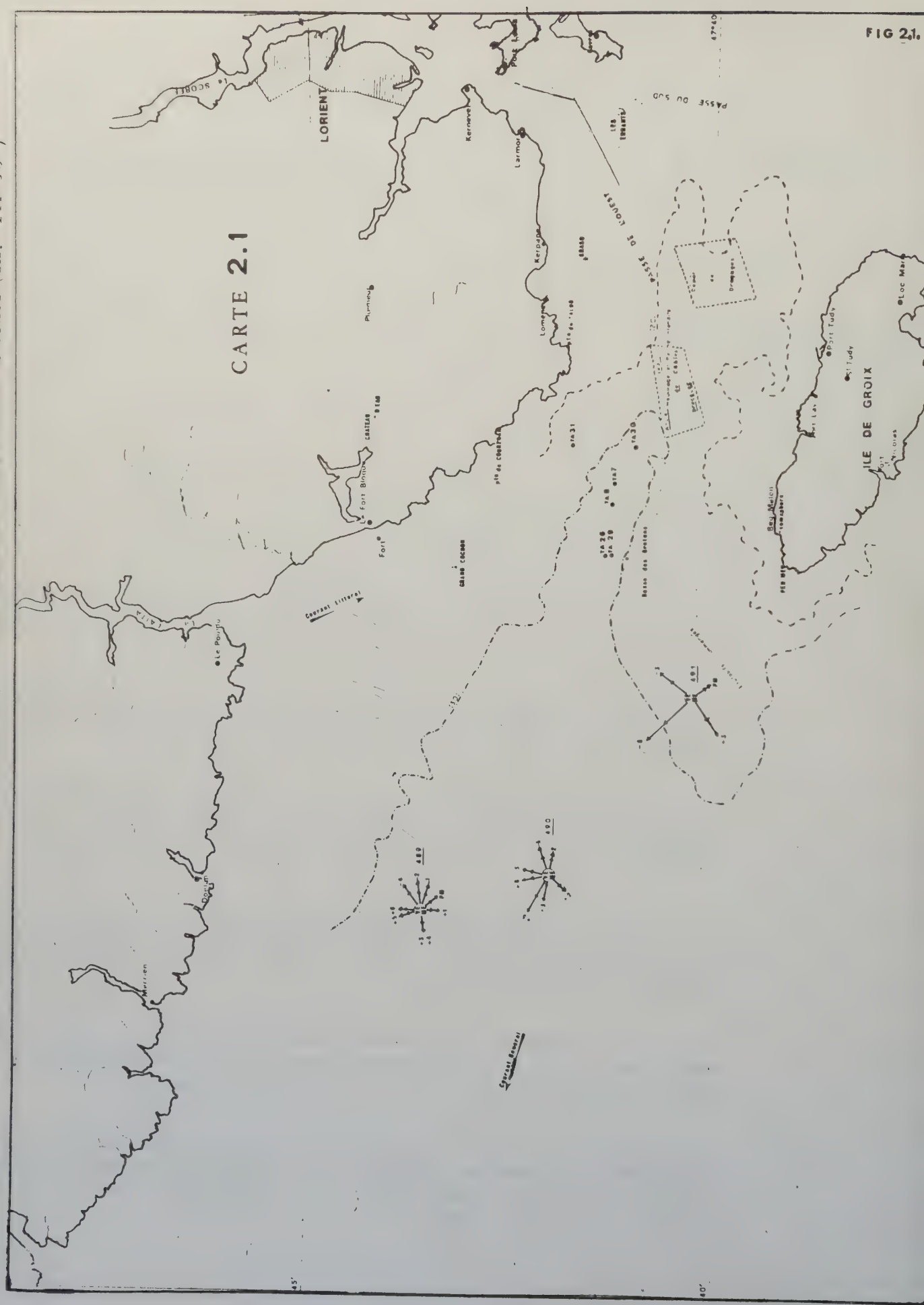
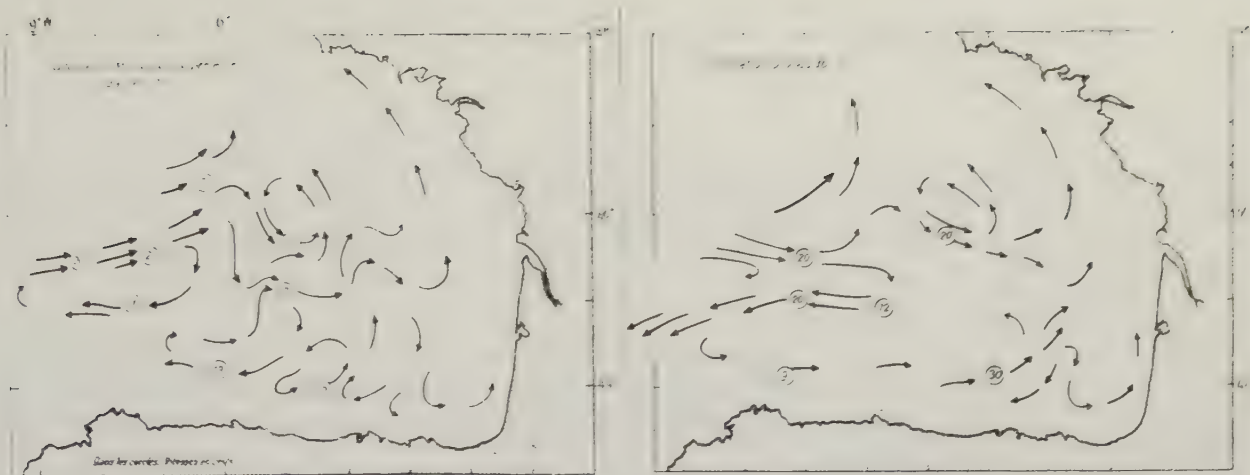


FIG 2.1.



(d'après J. LE FLOCH)

On peut y déceler l'amorce d'un courant portant au Nord-Ouest et longeant le littoral Sud de la Bretagne. De plus, en hiver de longues périodes de vents d'Ouest produisent de fortes surélévations d'eau sur la côte atlantique française (SH 550).

Malgré tout, la présence en certaines périodes de courants du large portant à l'Est n'est pas exclue.

Au voisinage d'une côte, le problème de la circulation est très complexe. Une analyse de données expérimentales permettra d'en tracer les grands traits, en s'appuyant sur des calculs prévisionnels de première approximation.

2 - 1 - 1 - Mesures et Observations antérieures (voir Plan 2-1)

L'ouvrage du Service Central Hydrographique "Courants de Marée dans la Manche et sur les Côtes Françaises de l'Atlantique" (SH n° 550), donne déjà un aperçu des courants de marée littoraux aux environs de Groix et de Lorient. Ces données ont été représentées sur le plan n° 2-1.

Entre la Basse des Bretons et le Pouldu, le courant de flot porte à l'Est, au Nord-Est à mi-flot, au Sud-Est en fin de flot ; il s'engouffre entre l'Ile de Groix et la côte, et se divise en deux veines :

- une première qui pénètre en rade de Lorient par la passe de l'Ouest,
- une seconde qui longe les côtes Nord de l'Ile de Groix et qui, à la Pointe des Chats, va infléchir son cours vers le Sud-Ouest puis le Sud.

La rencontre de cette dernière veine avec la veine de flot qui a contourné Groix et qui, à trois mille et demi au Sud-Est de la Pointe des Chats porte à l'Est-Sud-Est, se produit en des lieux très variables suivant les coefficients de marée et, en fait, très mal connus.

Aussi mal connue est la limite de la veine de flot qui, portant au Nord-Ouest à deux mille et demi au Sud d'Etel, longe la presqu'île de Gâvres et va constituer le courant de flot de la Passe du Sud.

Cette situation en flot est donc complexe, bien qu'elle soit schématique car les courants de marée purs sont extrêmement rares et l'influence des vents est considérable.

En jusant la situation est beaucoup plus simple puisque le phénomène directeur est le courant de vidange de la Rade de Lorient par les passes Ouest et Sud.

Mis à part le goulet de Port-Louis et l'entrée de la petite mer de Locmalo, les valeurs sont faibles; le courant de jusant de deux noeuds en vive-eau à la passe Ouest n'est plus que d'un noeud entre le Grasu et les Truies. Les stations 489* et 490* fournissent elles aussi des valeurs maximales inférieures à 1 noeud. La station 491*, très ancienne, fait seule exception.

En outre, l'ouvrage SH 550 fait état d'un courant général portant à l'Ouest et d'un courant littoral qui "porterait presque toujours au Sud-Est" entre le Pouldu et la Pointe du Talud.

2 - 1 - 2 - Mesures de courants 1967 et 1968

Ces renseignements fournis par les mesures antérieures ont permis d'orienter un programme d'étude vers trois types de mesures de courants :

- des mesures au fond de la Fosse du Talud où les courants de surface paraissaient très violents.
- une longue mesure de courant de surface, aux abords de la Pointe du Talud, qui semblait être à priori une zone de mélange de masses d'eaux. Cette longue mesure était destinée à relier quantitativement les différentes sortes de courants à leurs forces créatrices (coefficients de marée, vitesse du vent) ;
- des coupes verticales destinées à relier mesures au fond et mesures en surface et à déterminer la variation avec la profondeur des différents types de courants.

Le tableau ci-après présente les différentes mesures effectuées.

*- Voir carte 2 - 1. Ces numéros sont ceux des stations de courants de l'ouvrage SH 550.

FIG 2.2

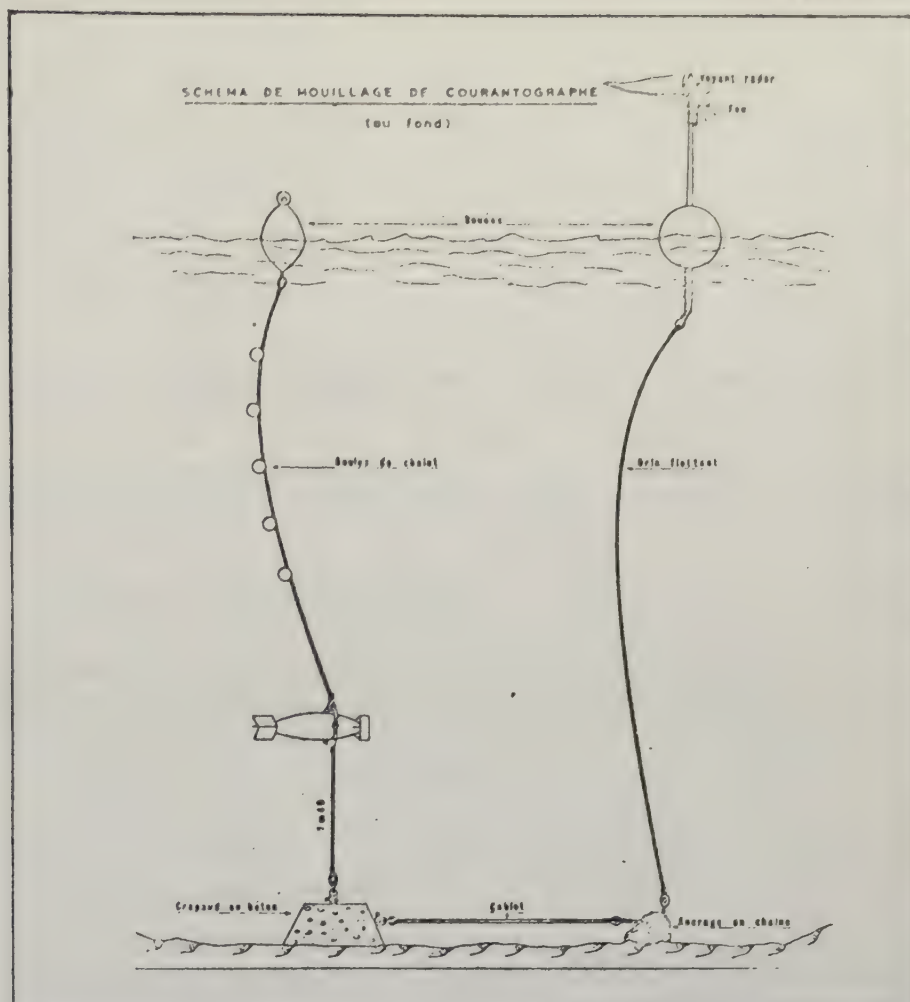
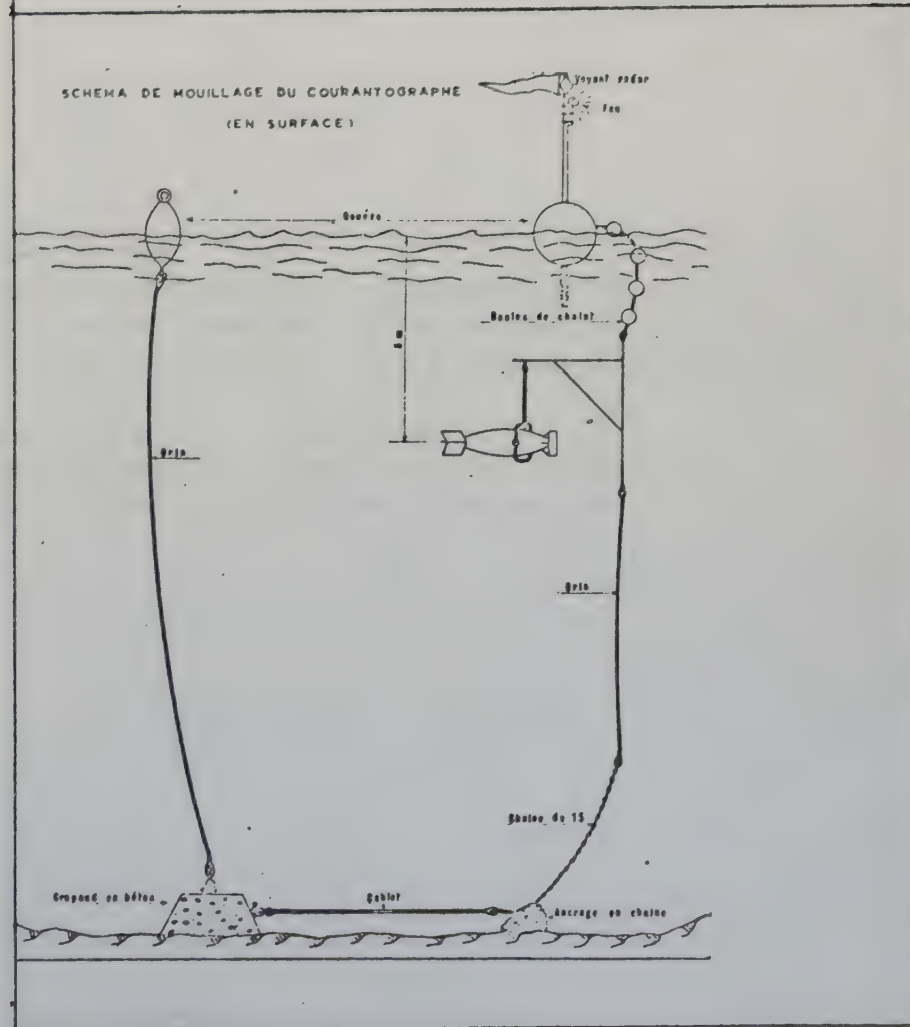


FIG 2.3



Date	Durée	Coeff. de Marée	Mesure au Fond	Mesure en Surface	Coupe Vert.	Empl.	Couran- tographe	Cou- tome
6 et 7/3/67	25 h	41 à 52	X			TA 8	X	
6 et 7/3/67	13 h	46		X		TA 7		X
14-15/3/67	25 h	76 à 83	X			TA 26	X	
15/3/67	1 h	80			X	TA 29		X
15/3/67	1 h	76			X	TA 29		X
27/7/67	1 h	61			X	TA 30		X
24/4/68 au 11/5/68	16 j	de 35 à 84		X		TA 31	X	

Sur trois mouillages de courantographe, les deux premiers (TA 8 et TA 26) furent réalisés avec le mouillage représenté sur le croquis n°2-2; le troisième (TA 31) avec celui du croquis n° 2 - 3.

Le premier dispositif ayant montré certaines imperfections, le deuxième comportait un système amortisseur de houle avec potence, chaîne flottante et chaîne de rappel.

2 - 2 - COURANTS de SURFACE -

Mesure du 24 Avril 1968 au 11 Mai 1968.

La longue durée de la mesure (16 jours) réclamait une corrélation avec les données météorologiques.

2 - 2 - 1 - Conditions Météorologiques

Les observations de la Station Météorologique de Lann-Bihoué (voir Tableau annexe p.17) de 1952 à 1968 montrent que les mois d'Avril et de Mai sont en gros des périodes de vents faibles - les vents les plus forts soufflant évidemment en hiver. Cependant, sur seize ans de mesures, deux années (1953 et 1961) ont vu leur maximum de vent en Avril ; ce furent, par ailleurs, des années de vents faibles.

La période choisie n'était donc pas, à priori, représentative de conditions très dures. La description des observations météorologiques donnée en annexe le confirme aisément.

En résumé, durant le temps de la mesure de courant, les vents furent principalement de secteur Ouest avec un maximum de 13m/s le 30 Avril. Il ne se produisit aucun "coup de vent" proprement dit.

Au sujet des vents, deux remarques sont intéressantes :

- sur le plan local, la présence de deux périodes de vents de secteur Ouest bien établis, séparées par des périodes de vents d'Est ou d'Ouest faibles ;

voir fig.2-4

- la différence assez considérable entre les conditions locales et les conditions du large. Le tableau p. 19 en annexe indique les directions et vitesses du vent sur les zones de Ouest-Bretagne, Ensemble Golfe de Gascogne et Région de Lorient. On y constate que les périodes de calme sont plus fréquentes au large.

SURELEVATIONS D'EAU A GROIX

Variations de la différence entre marée mesurée et marée prédite. (du 24/4/68 au 12/5/1968).

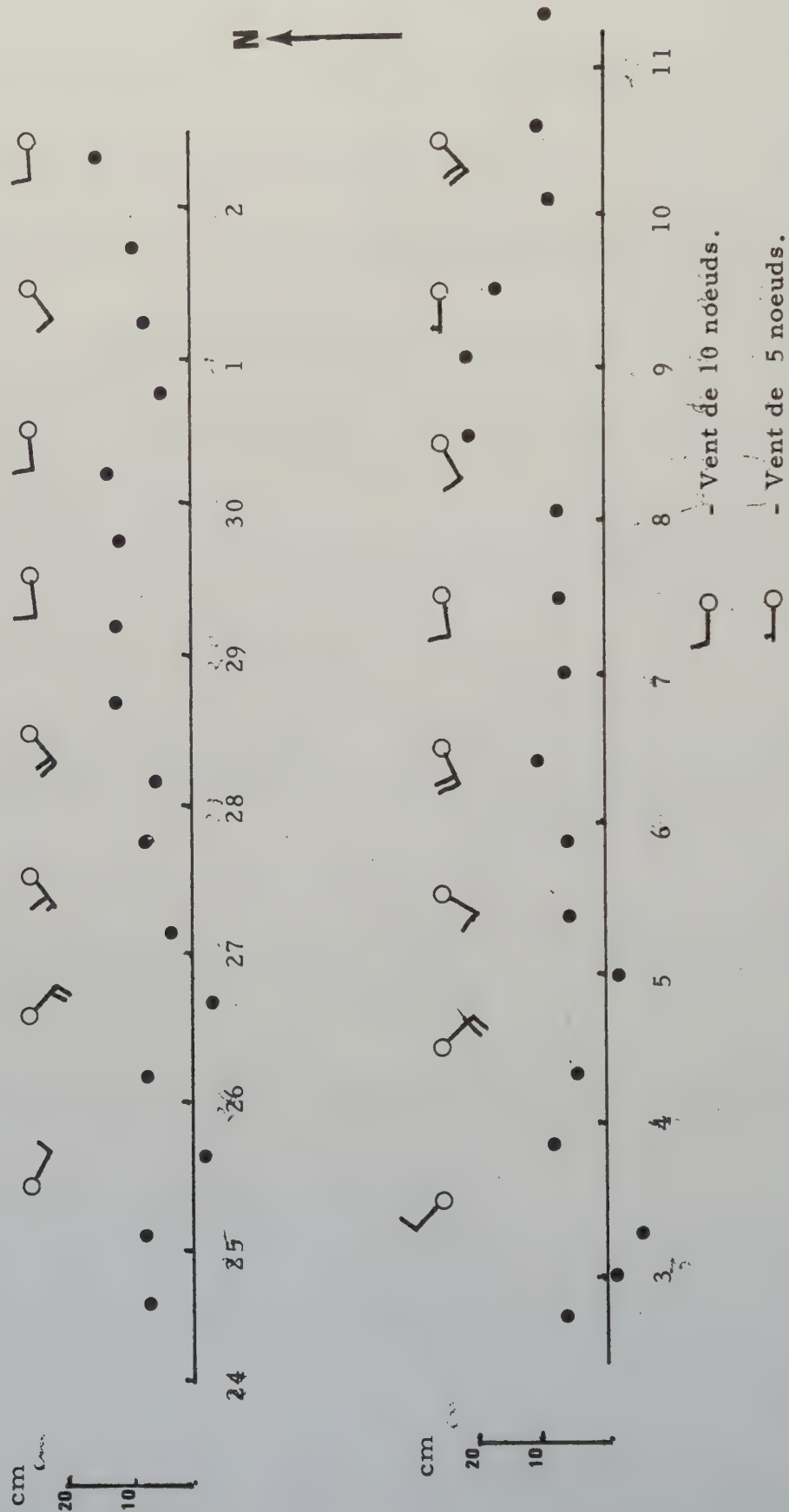
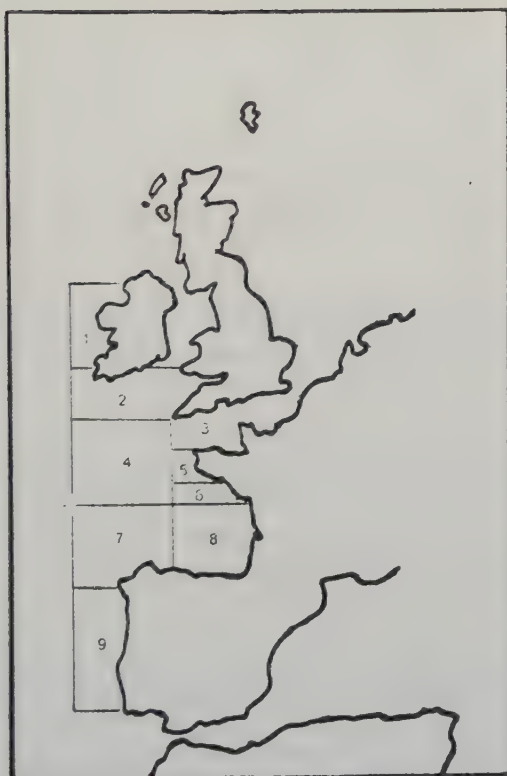


FIG 2.5

REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES ZONES METEOROLOGIQUES
CITEES DANS LE TEXTE.



- 1 = Ouest Irlande
- 2 = Sud Irlande
- 3 = Manche Ouest
- 4 = Sole
- 5 = Ouest Bretagne
- 6 = Nord Gascogne
- 7 = Cap Finisterra
- 8 = Sud Gascogne
- 9 = Ouest Portugal.

Les houles sont généralement faibles ou modérées d'Ouest elles vont devenir fortes à deux reprises :

- | | |
|---------------|----------------------------------|
| - le 28 Avril | Amplitude maximum : 4, 10 mètres |
| - le 8 Mai | Amplitude maximum : 4, 25 mètres |

La variation de la pression atmosphérique est marquée par trois dépressions :

- | | |
|---------------|--------------------------|
| - le 29 Avril | Minimum à 997 millibars. |
| - le 2 Mai | Minimum à 997 millibars. |
| - le 8 Mai | Minimum à 999 millibars. |

Ces renseignements sont à rapprocher des données marégraphiques de Port-Tudy (Ile de Groix).

La figure 2-4 représente en fonction du temps la différence entre la marée prédite et la marée mesurée, différence établie à chaque plein mer de Port-Tudy.

La hauteur de marée prédite a été affectée de la correction barométrique. Les différences de niveau doivent donc en principe être dues aux vents (si toutefois des apports de masses d'eaux à salinité plus faible venant de l'estuaire, ne jouent pas).

Trois surélévations sont à noter qui correspondent à des vents d'Ouest ou Ouest-Sud-Ouest, très faibles (10 noeuds).

2 - 2 - 2 - Présentation des Résultats Bruts

Les résultats de cette mesure ont été présentés en annexe (p. 6 à 9) par des droites de vitesses. Celles-ci sont constituées par des vecteurs "vitesses" rapportées de part et d'autre de la direction Nord-Sud. Ces vecteurs ont pour origine des points équidistants qui délimitent des périodes de 20 minutes. Toutes les douze heures, on a porté la vitesse et la direction du vent local.

En extrayant les composantes de ces vecteurs, composante S → N positive vers le Nord, composante O → E positive vers l'Est, on peut tracer des courbes représentant la variation de ces composantes en fonction du temps. Un lissage permet alors d'éliminer les valeurs singulières.

Un examen rapide de cet ensemble droite de vitesses - courbe de composantes, inspire les réflexions suivantes :

- 1) Les valeurs sont faibles. Le maximum général est de 40 cm/s le 1er Mai à 4 heures - le 4 Mai, par faible coefficient (43) et vents compris entre 3 et 5 m/s le courant ne dépasse pas 10 cm/s.
- 2) Les courants les plus forts et les plus fréquents portent au Sud-Ouest.
- 3) L'influence du vent semble considérable.
- 4) Les composantes sont la somme de termes périodiques et apériodiques, ces derniers très variables ; le courant de marée n'est donc pas directement accessible.

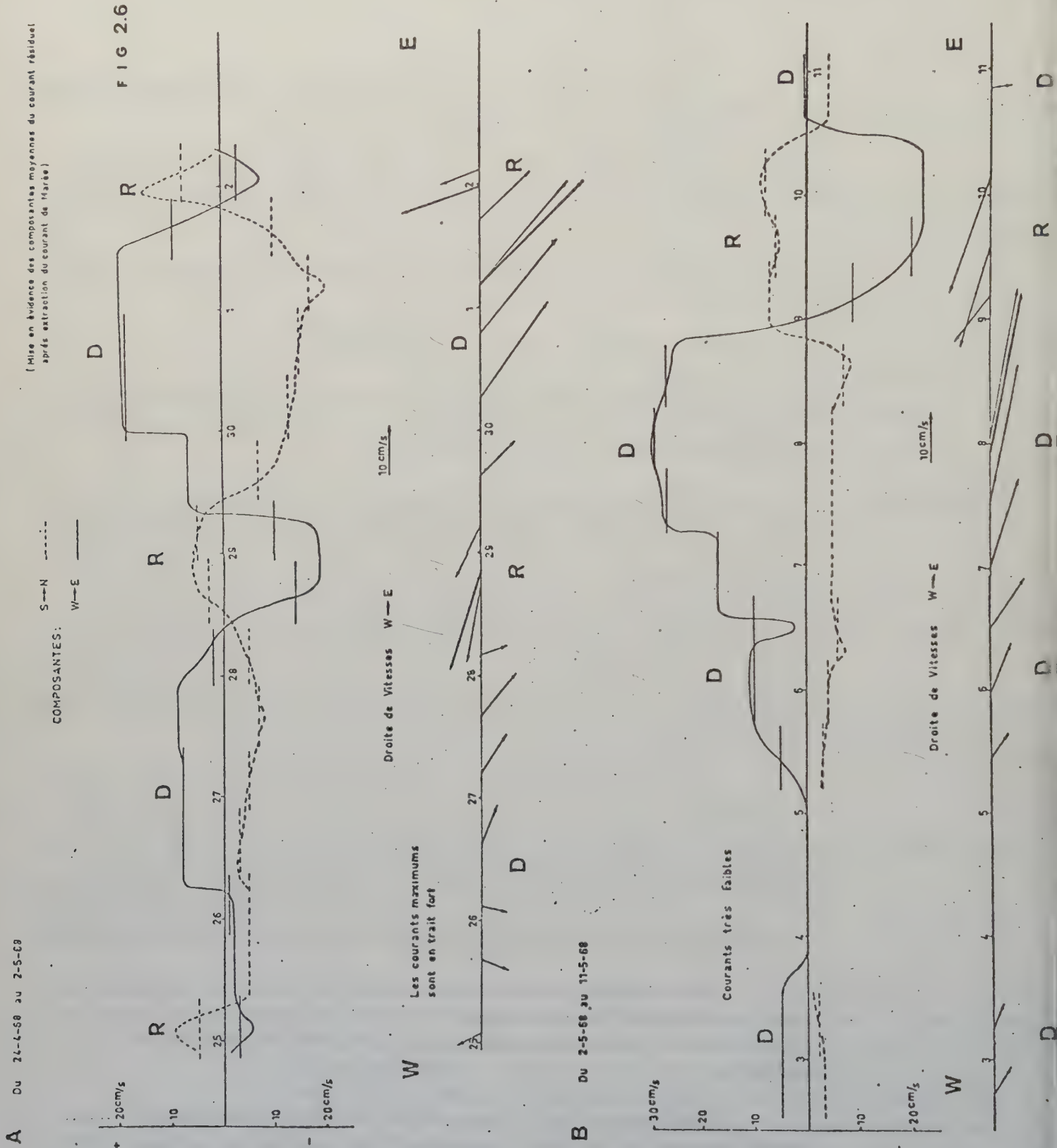
Pour séparer termes périodiques et apériodiques, une méthode vient à l'esprit, méthode analogue à celle de COURTIER pour les marées, et qui consiste à éliminer toutes les fonctions périodiques par intégration sur leur propre période : apparaissent alors des termes constants, les composantes des courants résiduels. Avec une marée de type semi-diurne la période est le demi-jour lunaire, soit en moyenne $T = 12\text{h } 25'$. Ce n'est qu'une moyenne et pratiquement l'intégration se fera sur l'intervalle séparant deux basses mers ; sur les seize jours de la mesure cet intervalle prend ainsi des valeurs comprises entre $12\text{h } 15'$ et $12\text{h } 45'$.

L'examen de la courbe elle-même permet de préciser l'utilisation de la méthode. Les courants dûs aux vents prennent naissance assez rapidement et leur apparition se marque sur l'une ou l'autre des courbes composantes par un brusque décrochement précédant un palier. On peut donc déplacer le module d'intégration de longueur T de part et d'autre d'une pleine mer de façon à choisir la période où les courants résiduels soient le plus constant possible.

Le résultat de cette opération est un terme constant par période considérée et pour chaque courbe composante. La figure représentative (se reporter Fig. 2-6) est donc une succession de paliers.

Une fois de plus, l'examen de la courbe composante elle-même permet de passer à un stade d'approximation cernant mieux le phénomène physique. Les brusques décrochements évoqués plus haut permettent de préciser la longueur (assez théorique jusque là) de certains paliers.

Variations en un point des courants provoqués par le vent durant 14 jours.



Ainsi, par exemple,
A et B se transforment
en A' et B' avec :

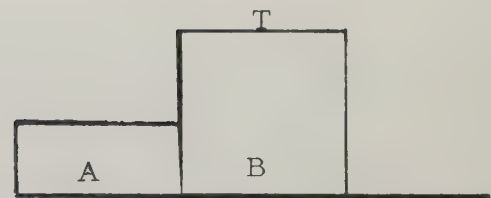
$$\text{Aire A} + \text{Aire B} = \text{Aire A'} + \text{Aire B'}$$

Un autre procédé, tout
aussi classique, permet
de substituer aux rectangles
formés par les paliers et
l'axe des temps, des trapèzes d'aire égale,
dans le cas d'une croissance régulière par exemple.

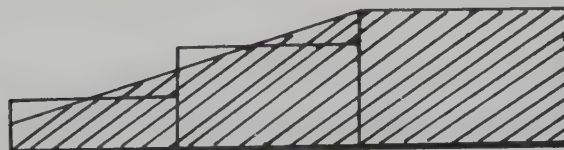
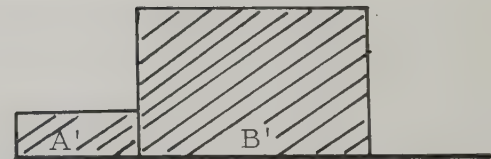
Courbe



I -



II -



On peut alors tracer des courbes enveloppes qui représentent assez
fidèlement en fonction du temps les composantes Sud → Nord et
Ouest → Est des courants résiduels.

(Voir Figure 2 - 6).

2 - 2 - 3 - Courants résiduels

Toujours sur la figure 2 - 6, les vecteurs construits à partir de ces composantes sont répartis le long d'un axe orienté Ouest-Est en une droite de vitesses où le temps est l'abscisse.

Ces vecteurs "courants" se groupent en deux familles principales :

Famille D	Famille R
<u>Courants portant en gros au Sud-Est</u>	<u>Courants portant au Nord-Ouest</u>
Ordre de grandeur 20 cm/s	Ordre de grandeur 20 cm/s
- Correspondent à des périodes où le vent local est de secteur Sud-Ouest modéré ou assez fort. - Sont réguliers et de longue durée.	- Correspondent à des périodes où le vent local est calme, faible et de secteur Ouest à Ouest-Sud-Ouest. - S'établissent et s'atténuent très rapidement. - Leurs 3 périodes principales correspondent exactement aux 3 surélévations notées sur la courbe des hautes mers de Port Tudy.

Les familles D et R se succèdent alternativement : D - R - D - R

Il ne semble y avoir aucune relation entre les courants^D et les conditions météorologiques régnant sur le Golfe de Gascogne et la Zone Ouest-Bretagne.

En conséquence, on peut considérer les courants portant au Sud-Est comme des courants de dérive dûs aux vents locaux de secteur Ouest. Leur direction est celle de la côte.

Les courants qui portent au Nord-Ouest en ce point (TA 31) sont d'origine plus complexe.

Pour envisager une prévision à leur sujet, il faut tout d'abord essayer de déterminer quelles peuvent en être les différentes causes.

2 - 2 - 3 - 1 - Origine des courants de la famille R

Ils sont indiscutablement liés aux surélévations d'eau notées à Groix (cf. fig. 2-4 et 2-6).

Ces observations font penser à des courants de pente mais si l'accumulation d'eau était locale, la pente serait descendante de Groix sur la côte et le courant de pente tendrait à se diriger vers l'Est.

Or, si l'emplacement du point TA 31 permet mal d'apprécier la direction générale de ces courants, d'autres mesures montrent bien qu'ils portent à l'Ouest (voir plus loin).

Durant les périodes où ces courants résiduels R dominent, les vents sont faibles (10 noeuds en général), de secteur Ouest avec une faible tendance à monter au Nord-Ouest. Il paraît curieux que ces vents soient seuls responsables de telles surélévations.

Le courant pourrait donc être plus général et concerner l'ensemble du Golfe de Gascogne ; on serait alors en présence de la circulation générale.

Une mesure semble le confirmer :

1ère Mesure : les 14 et 15 Mars 1967 (voir par.2-3-1)

Cette mesure de courant de fond, de 24 heures, eut lieu après deux périodes de gros temps :

- une tempête d'Ouest le 9 Mars, vent de 34 noeuds,
- une tempête de Suroit le 12 Mars, vent de 56 noeuds,
- , vent de 40, le 13.

Les jours de la mesure les vents étaient de secteur Sud (8 noeuds).

Les surélévations d'eau notées à Lorient (et non à Groix) furent importantes :

- le 14, à la pleine-mer du soir : + 0,20 m
- le 15, à la basse-mer du soir : + 0,50 m.

Le marégraphe de la Pointe Saint-Gildas, au Sud de d'embouchure de la Loire, indique les mêmes surélévations mais deux jours auparavant.

La mesure près du fond montre un courant qui ne se renverse pas avec la marée (voir fig. 2-13 et 2-14). Le courant résiduel porte d'abord au Sud-Ouest puis au Nord-Ouest, enfin à l'Ouest-Nord-Ouest.

S'il y a courant de pente il est donc très général et il semble bien que l'on soit là sous l'influence de la circulation du Golfe de Gascogne.

Mais la vitesse que peuvent prendre ces courants pose encore des questions. Déjà la mesure de 16 jours leur attribuait des valeurs de l'ordre de 20 cm/s, chiffre considérable pour une circulation générale même si l'on admet une accélération entre Groix et la côte.

Une deuxième mesure va montrer que la circulation générale n'est pas seule en cause.

2ème Mesure : le 27 Mars 1970.

La situation météorologique les 25, 26, 27 Mars 1970 était caractérisée par la présence d'un vaste anticyclone sur l'Atlantique et soumettant le Sud de la Bretagne à un régime de Nord-Ouest (vents de 10 à 20 noeuds). L'ensemble du Golfe de Gascogne était soumis à des vents de Nord et Nord-Est.

La situation n'était donc pas favorable à la création d'une accumulation d'eau dans le Golfe de Gascogne. Par contre, on notait des surélévations locales : à la pleine mer du soir, le 26 à Groix, le marégraphe enregistrait une surélévation de 35 cm, 40 cm à la basse mer du lendemain matin (27 Mars), 15 cm seulement à la pleine mer suivante.

Pour vérifier si à cette surélévation était associé un courant, ce même jour 27 Mars, trois flotteurs furent lâchés en Fosse du Talud, deux heures avant la pleine mer, et suivis durant une heure.

En cette zone, le courant de flot porte ordinairement au Nord-Est. Or, les trois flotteurs restèrent groupés et prirent la direction du Sud-Ouest à la vitesse moyenne de 19 cm/s.

Vu la situation météorologique sur l'ensemble du Golfe de Gascogne, la circulation générale ne semble pas être ce jour là l'élément dominant. La surélévation d'eau pourrait alors être attribuée à un brusque apport d'eau de l'estuaire. Le phénomène observé ne serait alors pas celui d'un courant de pente mais plus probablement celui d'un courant de "décharge" ou de "vidange" de l'estuaire.

On verra plus loin que des apports d'eaux saumâtres sont souvent associés à des courant portant à l'Ouest.

En première approximation, on peut donc considérer que les courants résiduels R sont un mélange de courants issus de la circulation générale du Golfe de Gascogne paprès un fort temps d'Ouest et de courants de décharge de l'estuaire.

2 - 2 - 3 - 2 - Courants de dérive -----

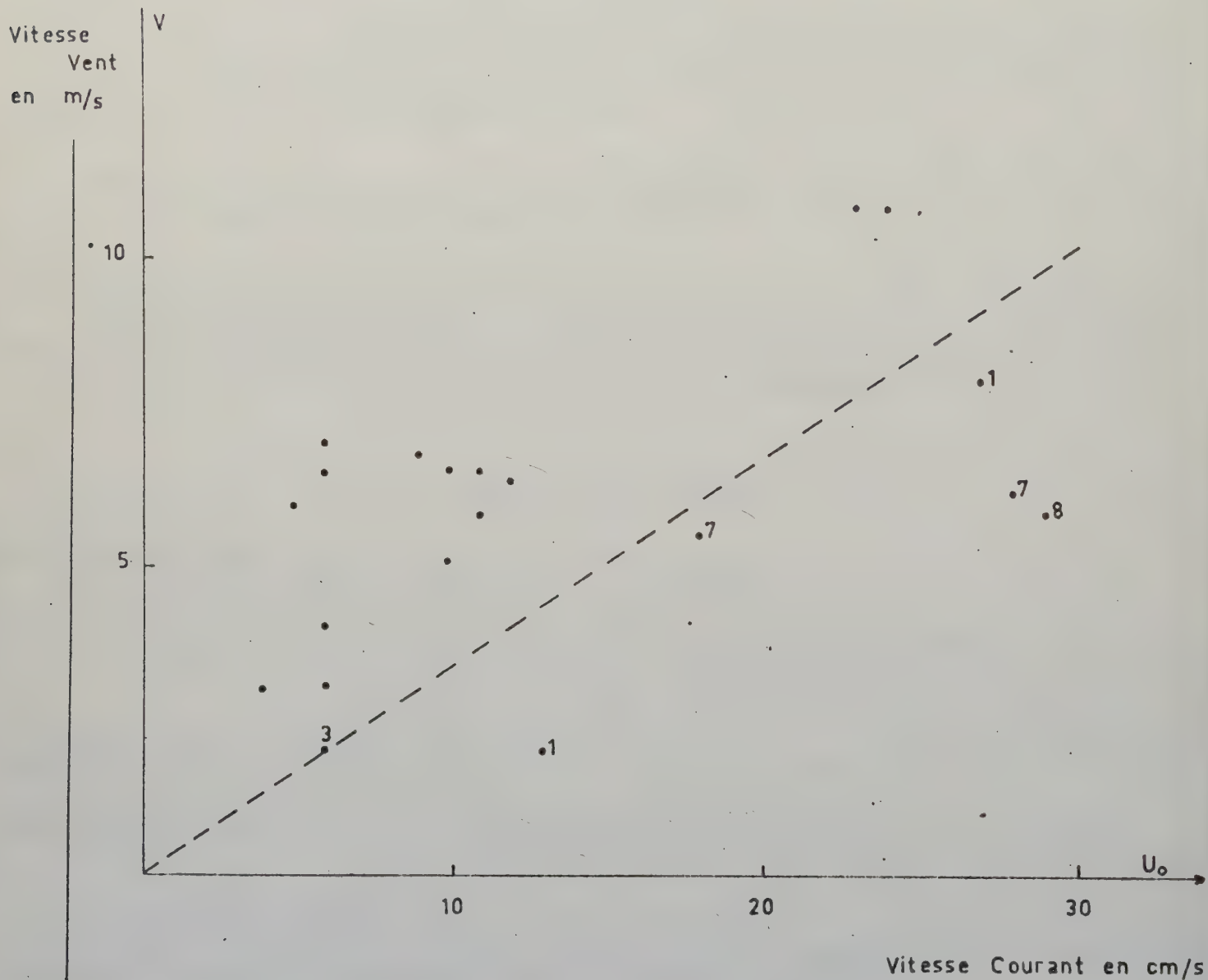
A partir des mesures du vent local toutes les trois heures heures * il est possible de calculer une vitesse moyenne du vent sur la même période qui a servi à extraire le courant de marée, c'est-à-dire en gros, douze heures. Cette vitesse V du vent peut alors être mise en corrélation avec la dérive mesurée U.

Ainsi la croissance d'un vent d'Ouest du 20 eu 30 Avril, passant de 3 à 6, 5 puis à 10, 8 m/s, s'accompagnera de la naissance d'un courant de dérive qui passe de 10 à 23 puis 24 cm/s. Sur cet exemple, il semble donc bien que le courant de dérive soit provoqué par le vent du lieu et du moment.

Cependant, il n'y a pas de relation simple entre les vitesses V et U. Au large, la théorie d' EKMAN et les observations de nombreux auteurs permettent d'appliquer la relation empirique suivante :

* Mesures aimablement communiquées par la station météo de l'Aéroport de Lann-Bihoué.

RELATION ENTRE VITESSE DU VENT
ET VITESSE DES COURANTS DE DERIVE



$$U_o = \frac{0,013}{\sqrt{\sin \varphi}} V \quad (1)$$

avec : v vitesse du vent) en m/s.
 U_o dérive superficielle)
latitude du lieu

Cette formule est valable par grands fonds et en régime permanent ; la valeur U_o qu'elle fournit sera donc considérée ici comme une valeur maximum.

Si on porte sur un même graphique, d'une part des valeurs de U correspondant à des courants où semblent dominer les phénomènes de dérive superficielle, d'autre part des valeurs V de vitesse du vent comme elles ont été définies plus haut, on obtient un nuage de points. La droite d'équation (1) partage ce nuage en deux parties distinctes :

- en haut, à gauche, la grande majorité des points représentant les courants inférieurs à ceux prédits par l'équation (1). C'est la population de points A. (Voir Figure 2 - 7).
- d'autre part, en bas, à droite, des points isolés correspondant aux maxima des deux plus longues périodes de courants de dérive, celle du 1er Mai et celle des 7 - 8 Mai. C'est la population de points B.

La population A représente des courants créés par des vents de Sud-Ouest ; ils n'atteignent jamais les valeurs théoriques des courants de dérive du large.

La population B^{*} figure des courants créés par des vents faibles et venant de l'Ouest ou du Nord-Ouest. Les vents réels sur la mer étaient peut-être alors plus forts que les vents mesurés à Lann-Bihoué, moins dégagé dans cette direction.

Avec cette restriction, on peut penser que la droite représentative de l'équation (1) fournit une valeur acceptable du maximum de courant de dérive.

* Ces courants sont toujours des courants de dérive portant à l'Est et ne doivent pas être confondus avec des courants de la famille R portant à l'Ouest.

2 - 2 - 3 - 3 - Prévision des courants apériodiques en un point

Est-il maintenant possible de prévoir au point où cette mesure de courant de 16 jours fut réalisée, les courants induits par des conditions météorologiques différentes ?

L'équation (1) permet de calculer un maximum raisonnable des courants de dérive :

$$A \text{ Lorient} : \quad = 47^{\circ} 40'$$

$$\text{et (1) devient} \quad \dots : U^{\text{cm/s}} = 1,5 \text{ } V^{\text{m/s}} \quad (2)$$

Les vents les plus forts (voir en Annexe tableau N°III) viennent du 260. Dans cette direction la valeur maximale d'un vent constant durant 12 heures est de 23 m/s.

Portant cette valeur dans (2), on en tire une vitesse de courant de dérive égale à : 34,5 cm/s.

Par contre, le maximum de courant résiduel portant à l'Ouest R, paraît difficile à estimer compte tenu des origines complexes de ce courant.

Cependant, il ne prend de l'ampleur que lorsque s'affaiblit le vent créateur de courants de dérive longeant la côte Le Pouldu-Talud, et ses valeurs semblent alors du même ordre de grandeur que ces courants de dérive.

Au point TA 31, courants de dérive portant au Sud-Est et courants résiduels portant au Nord-Ouest ne paraissent donc guère susceptibles de dépasser la valeur d'un noeud. Ce sont là des valeurs relativement faibles si l'on pense qu'il s'agit de courants de surface. Le paragraphe 2-2-3-1 a déjà laissé soupçonner qu'en certains endroits on pourrait rencontrer des valeurs plus fortes. La deuxième mesure de ce paragraphe montre déjà que la Fosse du Talud peut être, en surface, le siège d'un courant résiduel assez violent dominant un flot de coefficient 77.

En attribuant une vitesse de 10 cm/s au courant de marée, on voit que le courant résiduel pourrait être estimé à 29 cm/s et cela dans une situation météorologique très paisible.

Il est donc possible que dans cette veine le courant résiduel puisse atteindre à lui-seul des valeurs de l'ordre de 1 noeud dans des cas exceptionnels. (conjonction crues des fleuves - calme après une tempête d'Ouest)

2 - 2 - 4 - Les courants périodiques

2 - 2 - 4 - 1 - Description

Connaissant les courants résiduels et les courants totaux, il est possible par différence de calculer les composantes des courants de marée.

Lorsque les courants résiduels sont bien établis et suffisamment constants, la forme périodique du courant de marée apparaît clairement sur les graphiques des composantes (Voir graphique 2-8). Le point de mesure est très proche de la côte, cela explique le fait que l'on a toujours affaire à des courants du type "alternatif" ou "presque alternatif".

D'autre part, toujours avec des courants résiduels bien établis, le calcul des composantes de courants de marée à mi-flot et à mi-jusant laisse apparaître deux groupes de courants distincts.

Groupe A Courbe 1 du Graphique 2-8	Groupe B Courbes 2 et 3 du Graph. 2. 8
A mi-flot, ils portent au Nord-Est	A mi-flot, ils portent dans les directions allant de l'Ouest Sud Ouest au Sud Ouest.
A mi-jusant, ils portent à l'Ouest Sud-Ouest	A mi-jusant, ils portent dans les directions allant du Sud-Est au Nord-Est
Existent par vents calmes ou faibles c'est-à-dire qu'en général ils accompagnent les courants résiduels vers l'Ouest.	Existent lorsque les courants de dérive dominant, c'est-à-dire par temps d'Ouest, établi.

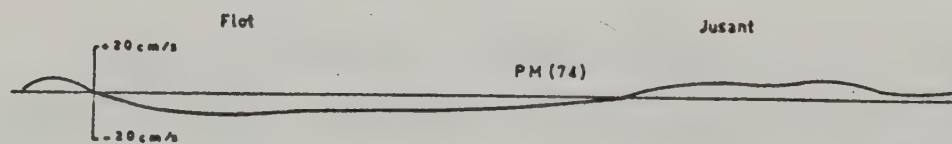
De plus, la présence des courants de marée, quels qu'ils soient, n'est sensible que pour des coefficients supérieurs à 60.

ASPECTS DES COMPOSANTES DU COURANT DE MAREE

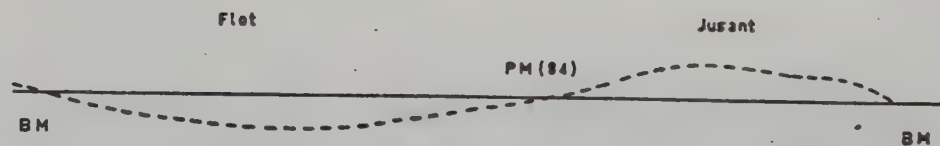
Composante W-E le 11-5-68



Composante S-W le 30-4-68



Composante W-E le 26-4-68 à 21h

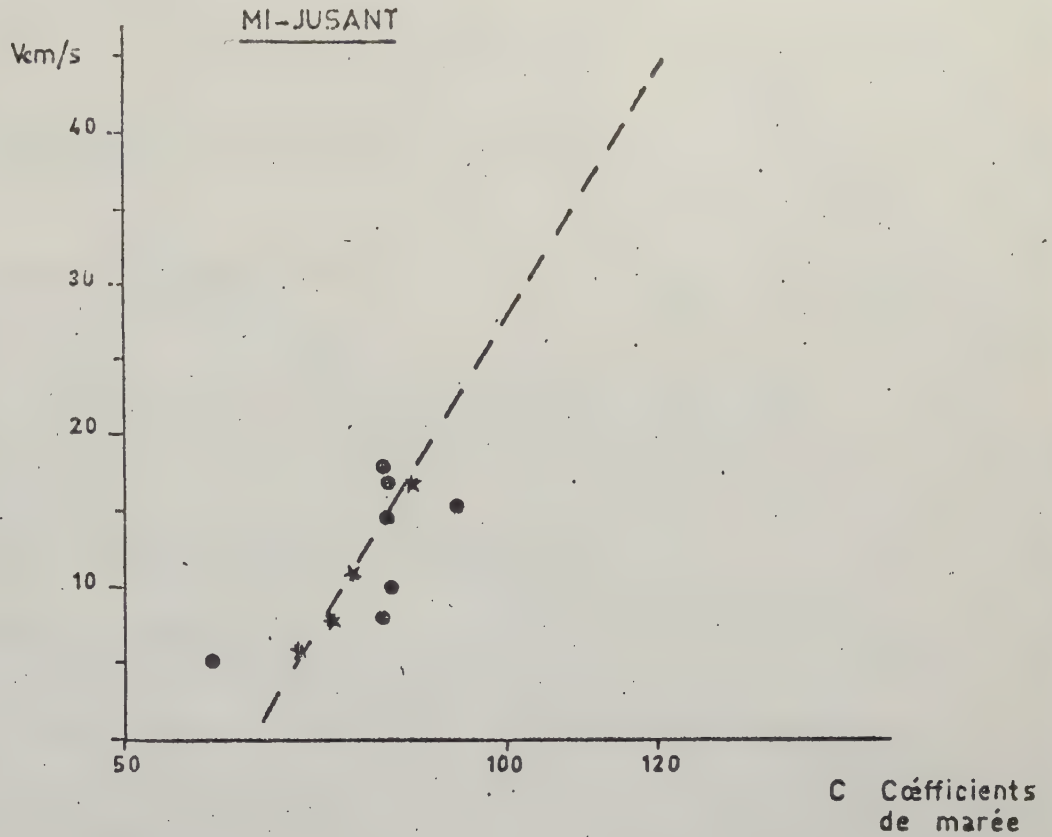


RELATION VITESSES. DU COURANT / COEFFICIENT DE MAREE

Vitesse du
courant de marée

Portant au
jusant à

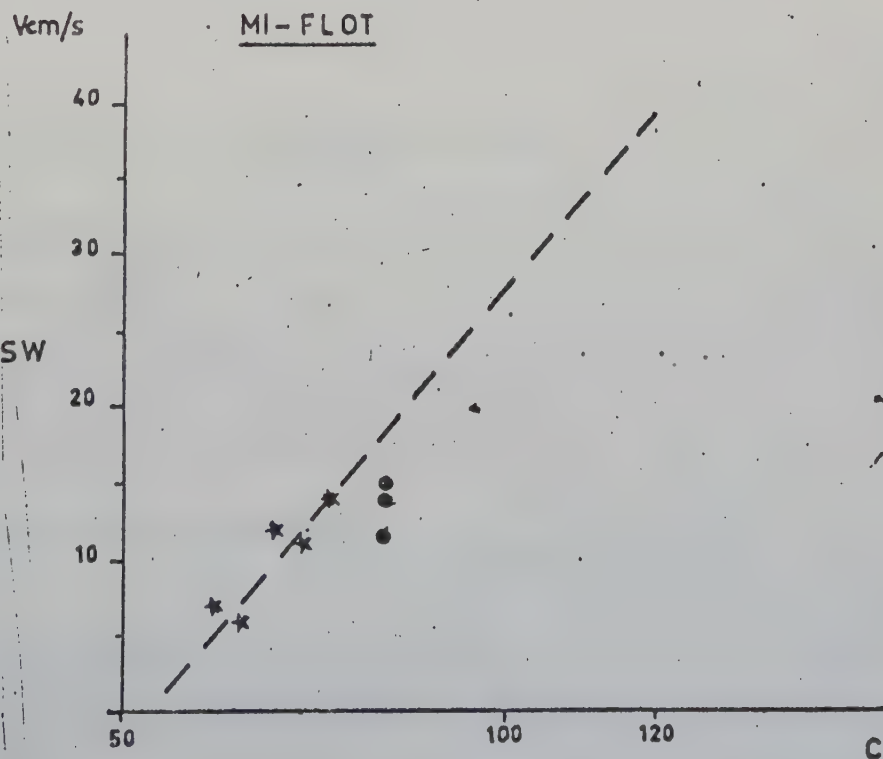
- * WSW
- de SE à NE



- * Groupe A
- Groupe B

Portant en
flot à

- * NE
- de WSW à SW



La mesure a lieu près d'une pointe et le courant de marée est du même ordre de grandeur que le courant de dérive ; il semble donc que les courants de la famille B soient dûs à un phénomène d'induction par les courants de dérive du changement de sens des courants de marée. (ce phénomène est illustré dans la figure 2-10).

2 - 2 - 4 - 2 - Prévision des courants périodiques

Pour des coefficients égaux ou supérieurs aux coefficients moyens, on admet qu'il y a une relation linéaire entre la vitesse V du courant de marée à une heure déterminée de la marée et le coefficient C .

Là encore, il y a séparation des deux groupes ; seuls les courants du groupe A présentent des caractères de linéarité, ceux du groupe B sont très dispersés.

En extrapolant au coefficient 120 (voir figure 2-9), on peut prédire les courants maxima du groupe A :

39 cm/s soit ~ 40 cm/s à mi-flot

44 cm/s soit ~ 45 cm/s à mi-jusant.

Le fait que les valeurs de flot soient inférieures à celles de jusant paraît assez logique.

Pour les courants de type B il n'y a aucune prévision possible ; pour un même coefficient et à une même heure de marée, ces derniers sont soit inférieurs, soit supérieurs aux courants de type A.

2 - 2 - 5 - Champ des Courants de Surface suivant les types de Temps

2 - 2 - 5 - 1 - Sens et directions des Vecteurs Vitesses

La carte n° 2-10 représente les directions et sens des vecteurs "Vitesses de Courants" dans différentes conditions de marée et de météorologie. Cette carte illustre la synthèse entre les renseignements antérieurs et les résultats et interprétations provenant des mesures de cette étude.

Trois observations importantes y sont schématisées :

Schémas de circulation

Flot

Jusant



a) par vents d'Ouest ; la confirmation de l'existence d'un courant longeant la côte du Pouldu au Talud, courant de dérive créé par les vents d'Ouest locaux.

b) ce courant se maintient à mi-jusant car il est du même ordre de grandeur que les plus forts courants de marée et tend à créer à la hauteur de la Pointe du Talud une situation tourbillonnaire autour d'une zone de calme. Cette situation, qui est visible d'ailleurs sur certaines photos aériennes, semble très variable en importance et en position.

A mi-flot une autre situation tourbillonnaire doit aussi se former, mais plus à l'Ouest.

Les courants de marée du type B, dans cette interprétation, sont donc considérées comme induits dans une circulation cyclonique ou anticyclonique par les courants de dérive.

c) par vents calmes ou faibles, l'existence d'un courant résiduel portant à l'Ouest, courant dû à la circulation générale ou à un phénomène de vidange de l'estuaire, ou à une conjonction des deux.

2 - 2 - 5 - 2 - Modules

On conçoit aisément la diversité des valeurs des vitesses de courants.

Elles sont fonctions du vent, de l'heure et du coefficient de la marée ; elles varient aussi suivant le lieu.

Ainsi, les valeurs calculées au point TA 31 pour un coefficient 95 (c'est-à-dire une marée moyenne de vive-eau) sont pratiquement deux fois plus faibles que celles des mesures antérieures entre le Gras et les Truies, c'est-à-dire dans la passe Ouest. Par contre, elles se rapprochent beaucoup des anciennes mesures en tout autre endroit.

Suivant les endroits, il faut faire la part des différents éléments du courant.

Ainsi, dans les passes, la force du courant peut être essentiellement attribuée au courant de marée.

Dans les autres zones, il faut envisager que le courant total est la somme des diverses sortes de courants élémentaires.

Le courant de marée semble avoir toujours des vitesses inférieures à 1 noeud, hormis dans les passes où la vitesse maximum de 2 noeuds est couramment admise.

Cette valeur de 1 noeud semble aussi le maximum des courants de dérive dûs aux vents de Sud-Ouest, les plus violents.

Les vents d'Est peuvent eux-aussi créer des courants de dérive. Le tableau III en Annexe fournit la valeur de 14 m/s pour un vent d'Est soufflant pendant 12 heures. Un tel vent créerait au maximum un courant de dérive de 21 cm/s (moins d'un demi-noeud).

Ce courant est susceptible de s'ajouter au plus fort courant résiduel R portant à l'Ouest dans la veine de la Fosse du Talud. On obtiendrait alors un courant de surface portant à l'Ouest à une vitesse maximale de : 1,5 noeuds (estimée très largement).

En cherchant à évaluer une valeur de "sécurité", c'est-à-dire une valeur telle qu'aucun courant actuel ne saurait la dépasser, on peut envisager la situation :

vent d'Est très forts + courant résiduel R maximum + mi-jusant de
coefficient 100.

Dans ces conditions exceptionnelles et dans cette zone précise, la vitesse du courant total pourrait atteindre 2,5 noeuds en surface.

A mi-flot, par contre, par vent de Sud-Ouest très violent et par coefficient 120, on ne peut guère compter que sur 2 noeuds de courants vers l'Est (en supposant alors nul le courant résiduel R).

En surface, les valeurs maximales de courants sont donc celles des courants portant à l'Ouest ; du point de vue du sédimentologue, c'est déjà un résultat.

Il faut examiner maintenant s'il en est de même au fond.

2 - 3 - LES COURANTS de FOND -

Deux mesures de vingt-quatre heures furent réalisées en Fosse du Talud, aux points TA 8 et TA 26 (Voir plan n°2-1), à 1, 5 m du fond.

Lors de la première mesure, une observation de courants de surface durant douze heures fut effectuée parallèlement à l'observation du courant de fond.

2 - 3 - 1 - Conditions Météorologiques

On trouvera en annexe (tableaux IV et V) le détail des observations météorologiques.

La première mesure (6-7 Mars 1967) eut lieu après quatre jours de vents de secteur Est (généralement Sud-Est) - le jour de la mesure et la veille, les vents sont Sud-Ouest et Sud-Sud Ouest ; la tendance barométrique confirme l'arrivée d'une dépression qui a traversé tout l'Atlantique à 100 km/h.

En calculant la différence entre la marée prédite et la marée observée sur l'échelle de l'Avant-Port de Lorient, on obtient après correction de la pression atmosphérique :

- le 6 Mars basse mer du soir : + 0,20 m
- le 7 Mars basse mer du matin : + 0,35 m
- le 7 Mars basse mer du soir : + 0,35 m.

Sur le navire lui-même, dans la nuit du 6 au 7 Mars, on a noté un vent venant du Sud-Est différent de celui qui règne au large.

La houle venait du Sud-Ouest : assez forte durant la nuit (mer 4) elle s'affaiblit dans la journée du 7 et l'opération de relevage s'effectue par mer 2.

La deuxième mesure (14-15 Mars) eut lieu après deux périodes de mauvais temps :

- une tempête d'Ouest le 9 Mars
- une tempête de Suroît le 12.

Les vents, par la suite, montèrent au Noroît et le jour de la mesure, ils étaient de secteur Sud et modérés.

On nota ces jours-là à Lorient des montées d'eau très importantes :

- le 14 à la pleine mer du soir + 0,20 m
- le 15 à la basse mer du soir + 0,50 m.

Ce dernier chiffre est considérable ; il montre bien l'afflux des eaux à la côte dû aux vents de Suroît. La comparaison de cette surélévation du niveau de l'eau à Lorient avec les enregistrements du marégraphe de la Pointe Saint-Gildas (Sud Loire), indique de plus un déphasage de deux jours entre des phénomènes analogues.

2 - 3 - 2 - Présentation des Résultats Bruts

2 - 3 - 2 - 1 - Première Mesure - voir graphique n° 2-11 (6-7 Mars 1967; coefficients de marée 37-41).

Le courant de fond est très faible ; sa valeur maximum est de 7 cm/s. Il est souvent nul, ou du moins inférieur à la sensibilité de l'appareil de mesure (2 cm/s). Surtout, et c'est là son caractère dominant, il est unidirectionnel (vers le Nord-Est) avec toutefois une faible tendance à "monter au Nord" en s'affaiblissant (du 70 au 48 en vingt-quatre heures).

Quelle est son origine principale ?

- Comme il s'affaiblit progressivement dans le même temps que se renforce au large le vent de Suroît (voir en annexe les observations du sémaphore de BEG-MELEN), il n'est pas dû au vent du large.
- L'absence totale de symétrie entre les deux périodes de flot et les deux périodes de jusant, l'absence de tout phénomène périodique, le fait que l'affaiblissement noté plus haut coïncide avec une croissance virtuelle des courants de marée dont les coefficients passent de 41 à 52 pendant la mesure, rien de ceci ne conduit à considérer la partie "courants de marée" comme importante sur le fond.

Une autre hypothèse reste à examiner : l'influence de la houle sur la ligne de mouillage (voir graphique des composantes n°2 - 12).

Dans le système de mouillage utilisé (voir le graphique n°2-2), le courantographe est solidaire de l'orin. De plus, dans ce type de courantographe, la situation dissymétrique de l'hélice à l'avant de l'appareil fait que, dans un mouvement pendulaire, la résultante des tours d'hélice dans un sens puis dans l'autre n'est pas nulle ; un résidu est enregistré, simulant un courant dirigé de l'avant vers l'arrière du courantographe.

Courants au fond et en surface le même jour

Vecteurs Vitesses Rapportés à la direction S → N

Courant de Surface

Les 6 et 7-3-67 Station Ta 7

Coef : 41

Coef : 46

Coef : 52

Jusant 19h06 BM

Flot

1h24 PM

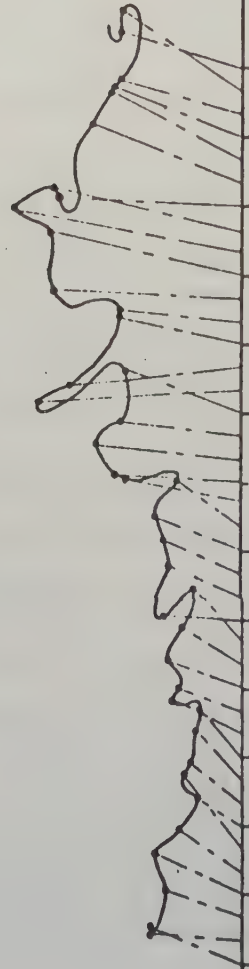
Jusant

7h41 BM

Flot

13h55 PM

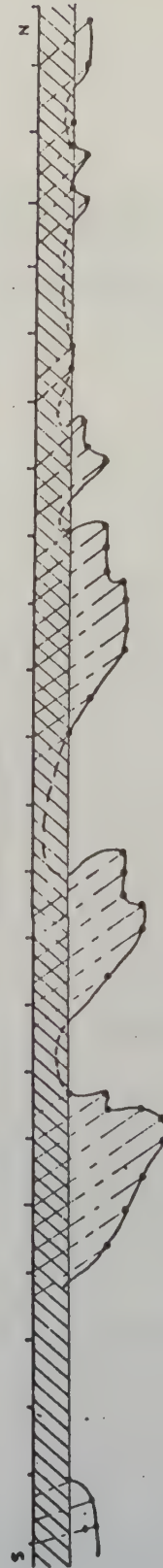
Echelle
0,10 m/s



Station T.a 8

Courant de fond

16h 17h 18h 19h 20h 21h 22h 23h 0h 1h 2h 3h 4h 5h 6h 7h 8h 9h 10h 11h 12h 13h 14h 15h



Les Abscisses
sont les heures T.U.

Echelle des Vecteurs Vitesse

0,05 m/s 0,10 m/s

STATION TA 8

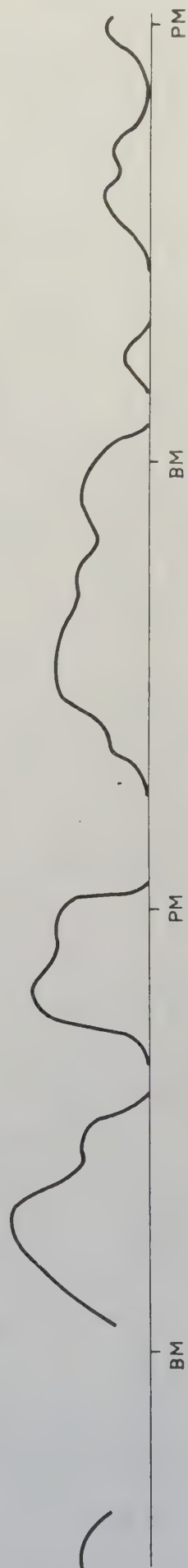
Courants de fonds Composantes

0 0.05 0.10 m/s

Composante S → N



Composante W → E



Or, ici la houle vient du Sud-Ouest, et crée précisément un mouvement pendulaire Nord Est-Sud Ouest de la ligne de mouillage.

- De plus, le courant mesuré s'affaiblit avec cette houle.

Il est donc possible qu'à un très faible courant de pente se superpose ce courant "artificiel" ; la seule conclusion qu'on puisse, par conséquent, tirer est l'extrême faiblesse des courants de marée au fond en morte-eau.

2-3-2-2- Deuxième mesure (14 et 15 Mars 1967 ; coefficients de marée 76-83).

Sur les deux représentations graphiques de ces résultats (planches n° 2-13 et 2-14) on a porté :

- les vecteurs vitesses sur une droite orientée Ouest-Est
- une variation des deux composantes Ouest-Est et Sud-Nord.

La mise en évidence des courants résiduels suivant la méthode du paragraphe 2-2-2, fait apparaître un courant portant d'abord au Suroît puis au Noroît enfin à l'Ouest-Nord Ouest.

On retrouve donc là le courant résiduel R portant à l'Ouest, et lié une fois de plus à des phénomènes de surélévations d'eau.

2 - 3 - 3 - Difficultés de Prévision des Courants au Fond

La Fosse du Talud, sorte d'entaille dans le plateau sous-marin rattachant l'Ile de Groix à la côte, peut paraître un endroit particulier pour y mesurer des courants de fond.

Ces mesures ont cependant le grand avantage de fournir des renseignements sur les conditions aux limites.

Ainsi, en morte-eau, les courants de marée sont difficiles à détecter et sont masqués par des interfacts ; dans les marées de 80, ils ne dépassent pas 5 cm/s (1/10 de noeud).

Mise en évidence près du fond, de la présence d'un courant résiduel vers l'Ouest.

Vecteurs - Vitesse

FIG 2.13

Vecteurs Vitesses Rapportés à la direction W-E

Courant de fond

Les 14 et 15-3-67

Station Ta 26

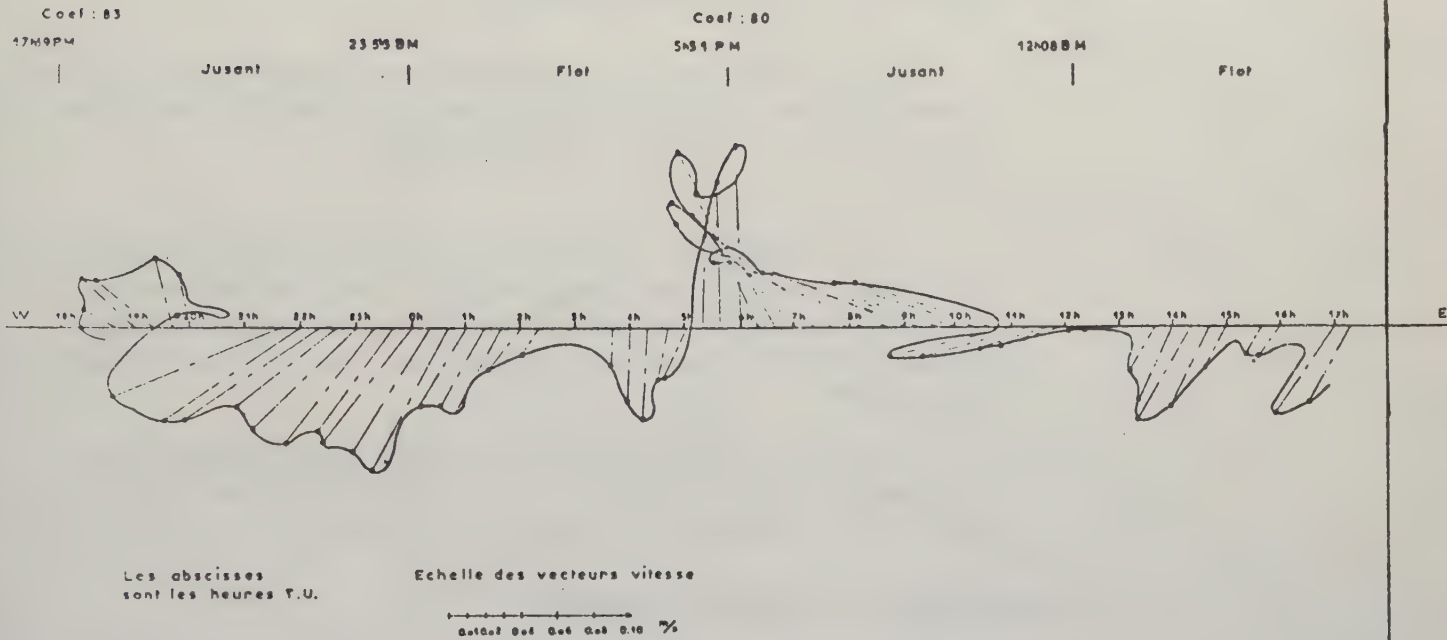


FIG 2.14

Composantes

TA 26 à 1m40 du fond

Courant total -
résiduel -

(Mise en évidence des composantes moyennes du courant résiduel
après extraction du courant de Marée)

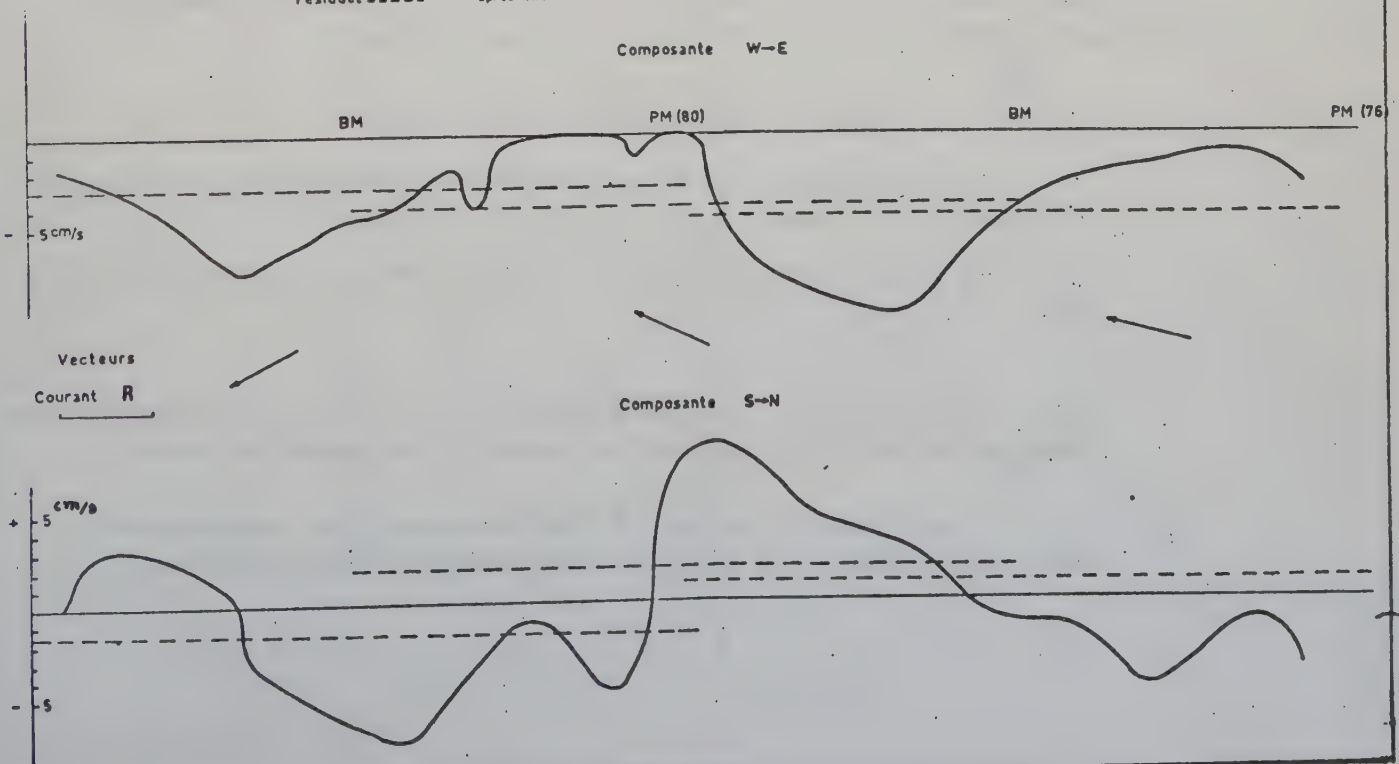
Composante W-E

PM (80)

BM

PM (76)

Composante S-N



Cette faiblesse relative des courants au fond par rapport aux courants de surface est en soi un résultat. En effet, elle démontre :

- que la Fosse du Talud est une zone de calme hydrodynamique, favorable à la sédimentation ;
- que les conditions hydrodynamiques actuelles ne peuvent expliquer un creusement dans les sédiments et que cette fosse est un témoin de conditions passées.

L'existence d'un courant résiduel du même ordre de grandeur que le courant de marée (5 cm/s au maximum) paraît certaine. Sa direction est certainement fortement influencée par la topographie du fond. Son origine paraît multiple.

Pour faire une prévision, même approximative des courants sur le fond, il faut donc essayer de les relier plus étroitement aux courants de surface.

2 - 4 - CHAMP VERTICAL des COURANTS -

Deux coupes verticales furent effectuées au courantomètre, l'une le 15 Mars 1967 en TA 29, 100 mètres au Sud de la première mesure de courants de fond, et dans le même temps que celle-ci. Cette coupe donne les vitesses et directions de courant à mi-flot et à mi-jusant.

Une deuxième fut réalisée en TA 32, à mi-flot, accompagnée de mesures de salinités et de repérage de températures.

2 - 4 - 1 - Présentation des Résultats Bruts

Le croquis n° 2-15 représente les deux "profils verticaux" de la première coupe, à mi-jusant et à mi-flot.

D'après la forme des " profils " on peut y distinguer deux zones :

- une Zone A comprise entre 0 et 20 mètres où interviennent courants de dérive, courants de marée et courants résiduels.

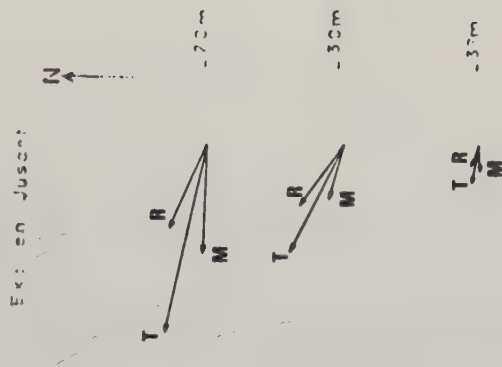
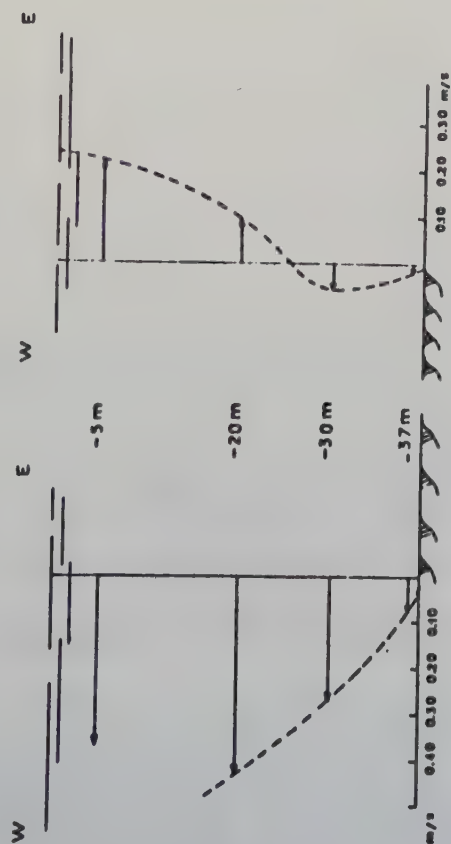
- une Zone B, entre 20 et 40 mètres, donc située dans la fosse proprement dite et où l'amortissement est considérable.

Profils verticaux de vitesse.

Le 13-3-67 a Ta 29

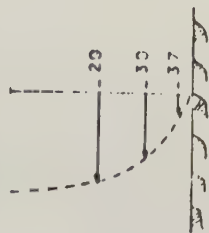
Coef : 80 Mi-Jusant

Coef : 76 Mi-Flot



20 cm/s

Variations du Courant R



Variations du Courant M

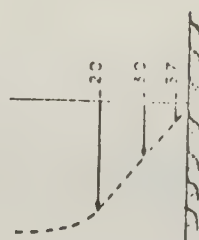
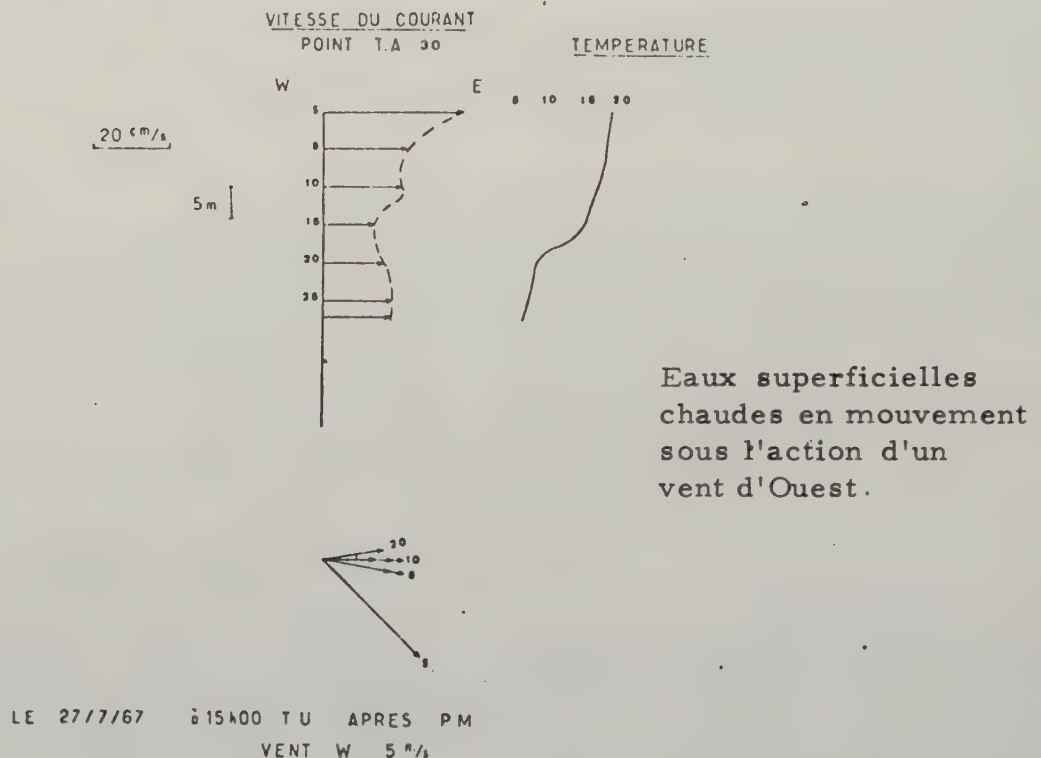


FIG 2.16

Profondeur d'influence du frottement et thermocline.



Le croquis n° 2-16 met en parallèle le profil des vitesses de courants (mesure du point TA 32) avec la courbe représentant la température fonction de la profondeur.

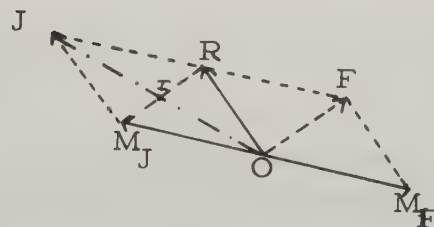
Le vent d'Ouest agit sur des masses d'eaux superficielles chaudes (c'est un après-midi d'été) et le courant de marée semble constituer un fond continu en gros assez constant jusqu'à 28 mètres.

2 - 4 - 2 - Calcul graphique des courants M et R

Elle porte sur la première mesure.

Considérant que dans la zone B du paragraphe 2-4-1, interviennent seuls le courant résiduel R et le courant de marée M, on peut, pour faciliter l'interprétation, introduire les deux approximations suivantes :

- a) les courants de marée purs, en ce point, sont du type alternatif, c'est-à-dire qu'à mi-flot et à mi-jusant, ils ont même direction mais des sens opposés ;
- b) leurs modules à mi-flot et à mi-jusant sont suffisamment voisins pour être considérés comme égaux sans simplification abusive.



Les courants mesurés $\vec{J}$ et $\vec{F}$ sont alors les résultantes du courant résiduel $\vec{R}$ et des courants de marée à mi-jusant et à mi-flot $\vec{M}_J$ et $\vec{M}_F$. $\vec{F}$ et $\vec{J}$

sont donc les diagonales d'un parallélogramme construit sur $\vec{R}$ et $\vec{M}_J$ ou $\vec{R}$ et $\vec{M}_F$.

Une construction vectorielle simple va donc permettre d'apprécier $\vec{R}$ et $\vec{M}_J$ ou $\vec{M}_F$. Il suffit, au point I, milieu de $\vec{OJ}$,

de porter un vecteur équivalent à $\vec{OF}$, tel que le point milieu de ce vecteur coïncide avec I. La construction du parallélogramme sur ces deux diagonales donnera $\vec{OR}$ et $\vec{OM}_J$. $\vec{OM}_F$ sera déduit par symétrie.

Les résultats de ces constructions sont représentés sur la figure 15 ainsi que la variation depuis le fond jusqu'à -20m du courant résiduel R et du courant de marée. *

Or, la Fosse du Talud se présente comme une entaille creusée à -40 mètres dans un ensemble de structures sédimentaires situées à -20 mètres ; courants de marée et courants résiduels vers l'Ouest ne doivent pas, en Fosse du Talud à -20 mètres, être loin de leur valeur maximale.

* De la surface à la profondeur D (soit de 0 à 21 m: zone A) intervient en plus le courant de dérive ; les simplifications et partant les constructions vectorielles ci-dessus ne sont alors plus possibles. Seule la zone B, c'est-à-dire la Fosse elle-même, est interprétée.

Ainsi, pour un même coefficient, à -20m, la valeur du courant de marée, atteint presque le double de celle d'un courant de surface en TA 31 (24 cm/s pour 12,5 cm/s). Ce résultat est à rattacher aux conclusions du paragraphe 2-2-5-2 ; la Fosse du Talud se trouve être le plus souvent le trajet où le courant de marée est le plus violent, tout au moins en surface.

Si les lois d'affaiblissement du courant de marée et du courant résiduel paraissent différentes, il faut bien voir qu'en fait c'est le courant total qui est affaibli. Les dissipations d'énergie liées à la turbulence correspondent à de petites variations de vitesse du courant total pris dans son ensemble.

2 - 4 - 3 - Estimation quantitative

L'étude de la Fosse du Talud permet de rappeler le fait suivant : les courants sont peu variables de 5 à 20 mètres. Leurs conditions aux limites, au voisinage du fond, sont plus difficiles à préciser.

En première approximation, et pour des raisons topographiques, on peut donc considérer les mesures de courant à - 5 mètres (c'est-à-dire du courant de navigation) comme représentatives d'une tranche d'eau d'épaisseur 20 mètres.

Cette profondeur d'eau de 20 mètres est, on l'a vu plus haut, la plus courante entre Groix et la côte.

Du point de vue de l'application sédimentologique, il est alors intéressant de comparer les valeurs ainsi obtenues avec les valeurs théoriques des courants susceptibles de remettre en mouvement les grains de sable tapissant les plateaux entre Groix et la côte, tout en sachant que le courant mis en jeu est certainement plus important que le plus fort courant actuel.

La mesure de courant à -5 mètres est, par conséquent, en tout état de cause et pour un endroit déterminé du plateau rattachant l'Ile de Groix à la côte, la mesure d'un courant maximum. Ainsi prendre cette valeur comme valeur du courant sur le fond pour des travaux d'aménagement du littoral par exemple, revient à prendre une marge de sécurité.

On retrouve, par conséquent, comme limite supérieure des courants dans cette tranche de 0 à 20 mètres, les valeurs de deux noeuds du paragraphe 2 - 2 - 5 - 2 (3 noeuds dans la veine du Talud).

Pour une fosse, le problème est différent et les phénomènes d'affaiblissement vers le fond, au-dessous de 20 mètres sont considérables.

Cette différence fondamentale de distribution des vitesses de courant avec la profondeur entre le plateau et les fosses, se marque évidemment dans la sédimentation.

2 - 5 - MESURES COMPLEMENTAIRES -

2 - 5 - 1 - Hydrologie

2 - 5 - 1 - 1 - Mesures

Le 15/3/1967, au point TA 29, deux coupes de salinité à mi-jusant et à mi-flot donnent les résultats suivants :

Mi-jusant			Coëff. 80		Mi-flot		Coëff. 76	
Prof.	Température	Salinité 0/00			Température	Salinité 0/00		
- 2 m	9°9	33,6			10°3	31,6		
- 5 m	9°9	33,6			9°9	32,0		
- 10 m	9°9	33,7			9°9	32,0		
- 15 m	9°9	33,7			10°0	32,1		
- 20 m	9°9	33,95						
- 25 m	10°15	34,6						

Ces mesures ont été effectuées avec un thermo-salinomètre à induction.

Les faibles valeurs de salinité obtenues à mi-flot ont conduit à faire deux prises d'eau de contrôle. Les dosages de salinité ont été réalisés par la méthode de MOHR-HARVEY : les résultats obtenus confirment à la précision du dosage près, les chiffres de salinité de l'appareil à induction.

Un peu plus au Sud, en TA 27, sur la roche KAREK-HUEL, par coefficient 39, on obtient les coupes suivantes :

Le 4 Avril 1967 - Coefficient 39 -

Etable de pleine mer			Mi-jusant	
Prof.	Température	Salinité 0/00	Température	Salinité 0/00
- 1 m	10°3	34,5	10°7	34,0
- 5 m	10°0	34,8	10°6	34,6
- 10 m	10°0	34,8	10°2	34,8
- 15 m	10°0	34,9	10°2	35,3
- 20 m	10°5	35,0	10°2	35,3
- 25 m	10°3	35,5	10°2	35,3
- 30 m	10°8	35,5	10°2	35,3
Fond	10°8	35,5	10°2	35,3

Ces mesures ont été réalisées cette fois avec un thermo-salinomètre à pont de KOHLRAUSCH.

2 - 5 - 1 - 2 - Analyse

Les observations qu'on peut en tirer sont les suivantes :

- il y a une nette stratification des eaux entre la surface et le fond ;
- les valeurs les plus basses de salinité sont du même ordre de grandeur que celles du goulet de Port-Louis ;

- les irrégularités de la température entre la surface et le fond d'une part, le fait qu'on puisse trouver à mi-flot des salinités plus faibles qu'à mi-jusant d'autre part, sont deux observations qui font songer à des phénomènes d'estuaire. On retrouve en tout cas les mêmes phénomènes d'allées et venues de masses d'eaux saumâtres, par des voies différentes en flot et en jusant.

Cette reconnaissance de masses d'eaux plus douces entre l'Ile de Groix et la côte est à rapprocher d'une découverte analogue dans les coureux de Belle-Ile. *

On retrouve là l'hypothèse (LACOMBE dans SH 550) d'un courant de pente très général emmenant vers l'Ouest les masses d'eaux douces de la Vilaine (à Belle-Ile) ou du Blavet (à Groix).

Ce phénomène n'est cependant pas constant : le 27/7/68, soit en été et dans une période de très faibles vents d'Ouest, sur une ligne joignant le Phare de Pen-Men à la Pointe de Couregan (voir Plan n° 2-1), les salinités en surface restaient uniformes et égales à 35,2 0/00.

Malgré tout, l'existence d'une veine de courant de marée plus violent Passe-Ouest - Fosse du Talud, l'existence dans cette même zone de masses d'eaux saumâtres font penser à la partie marine d'une formation estuarienne.

2 - 5 - 2 - Bouées Dérivantes

Les opérations de levé sismique, dans cette région, ont nécessité la mise en place d'un balisage, à une certaine distance de la côte, constitué de bouées "réglées court" sur des crapauds assez légers.

Abandonnées durant une assez longue période, elles ont "chassé", fournissant ainsi des renseignements précieux sur la direction résultante des courants, pendant une période déterminée.

* Au cours d'une mission d'essais d'appareils sur le "Point d'Interrogation", Patron Roger WEIGLE, Directeur du C.I.P. des Glénans, j'avais trouvé des masses d'eaux à 33 0/00, au mois de Juin, sur la côte Nord de Belle-Ile. Ce phénomène était fort connu des marins d'autrefois (les premières éditions des Instructions Nautiques le signalent) qui l'attribuaient à des sources sous-marines.

Toutes ont dérivé vers l'Ouest, et cela malgré des vents d'Ouest dominants.

L'une d'entre elles, en onze jours, a parcouru 1180 mètres (distance mesurée par points au cercle hydrographique), vers le 268, dans la veine de courant de la Fosse du Talud.

Il y a donc là confirmation de courants maximum portant à l'Ouest, renseignement important pour le sédimentologue.

2 - 6 - CONCLUSION

En résumé, cette étude a démontré l'existence, par temps d'Ouest, d'un courant littoral entre l'embouchure de la Lafta et la Pointe du Talud.

Si les bulletins météorologiques permettent une bonne prévision du vent géostrophique, ce courant peut être estimé vingt-quatre heures à l'avance avec une précision plus que suffisante pour des travaux à la mer.

Les courants de marée ont été évalués, calculés et prédits en un point (prédiction centenaire), comparés à d'autres mesures ; l'établissement de la loi de prévision a permis de les classer en deux catégories, correspondant à deux schémas différents de circulation littorale (voir croquis 2-10). Comme ces deux schémas peuvent eux-mêmes être rattachés à deux groupes de situations météorologiques prévisibles par les moyens actuels, on peut estimer que cette circulation littorale est elle aussi prévisible.

Courants de marée, courants de dérive et courants dus à des influences extérieures (estuaire, circulation générale) se mêlent dans cette zone de différentes manières. Le résultat le plus intéressant est une mise en évidence d'une zone correspondant en gros à la Fosse du Talud, où statistiquement parlant, les déplacements sont dirigés vers l'Ouest.

Dans cette zone, les sédiments en suspension tendront donc à se diriger vers cette direction. On peut déjà prévoir que les vents d'Ouest par les long-shore currents des houles doivent avoir sur les transports de sédiments à la côte une action inverse.

Il y a là déjà la perspective d'un équilibre sédimentologique.

Une autre application à la sédimentologie est évidente : deux zones apparaissent nettement entre Groix et la côte :

- d'une part un plateau avec des fonds de l'ordre de 20 mètres, balayé par des courants pouvant atteindre deux noeuds ;

- d'une part, des fosses, quelquefois le siège de violents courants mais en surface avec un affaiblissement tel en profondeur qu'il serait difficile d'envisager plus de 2/10° de noeud sur le fond.



CHAPITRE III ,

ETUDE DES HOULES A LA COTE

Introduction - Mesures.

Description des résultats - Analyse statistique.

Rattachement de la houle mesurée à la houle du large.

Corrélations Houle - Météorologie.

Estimation d'un clapotis d'estuaire.

Conclusion.



3 - 1 - Introduction3 - 1 - 1 - Position du problème :

Dans une étude de régime des côtes, l'analyse des houles n'est pas une fin en soi. La houle, près du rivage, est capable d'arracher, de remettre en suspension des matériaux ; elle est capable, aussi, de les transporter le long de la côte, par les courants que son déferlement oblique provoque. Il s'agit, par conséquent, de définir les effets maximum de la houle, et cela, de la façon la plus rentable possible, c'est-à-dire, avec le minimum de mesures directes.

3 - 1 - 2 - Mesures 1968 :

Avant 1968, il n'y avait eu aucune mesure de houle dans la région, mises à part les observations d'état de la mer des guetteurs sémaphoriques.

L'appareil utilisé (voir en annexe les détails de réglage) fut un houlographe à pression, mouillé sur le fond à 100 mètres du point de mesure de courant TA 31. (voir plan 2-1). De ce fait, courantographe et houlographe donnèrent des résultats corrélables.

La position du point TA 31, près d'une côte granitique très sauvage, permettait d'espérer des conditions très dures, donc maximales ; de plus, le mouillage sous vingt-six mètres d'eau provoquait un filtrage des petites oscillations et, là aussi, mettait l'accent sur les conditions maxima.

La mesure eut lieu du 24 Avril 1968 au 18 Juin 1968.

3 - 1 - 3 - Météorologie :3 - 1 - 3 - 1 - Le "fetch".

Ce dernier mot d'origine américaine n'a pas d'équivalent en français, et demande quelques explications.

Un vent soufflant au large, pendant un certain laps de temps, lève, sur une mer zéro, une houle dans une certaine zone appelée "aire de génération de la houle" ("generating area"). Les limites de cette aire sont les limites de l'invariabilité des caractéristiques du vent. Autrement dit, l'allure des isobares d'une simple carte météorologique permettra de déterminer une telle zone, et ses limites en seront par conséquent :

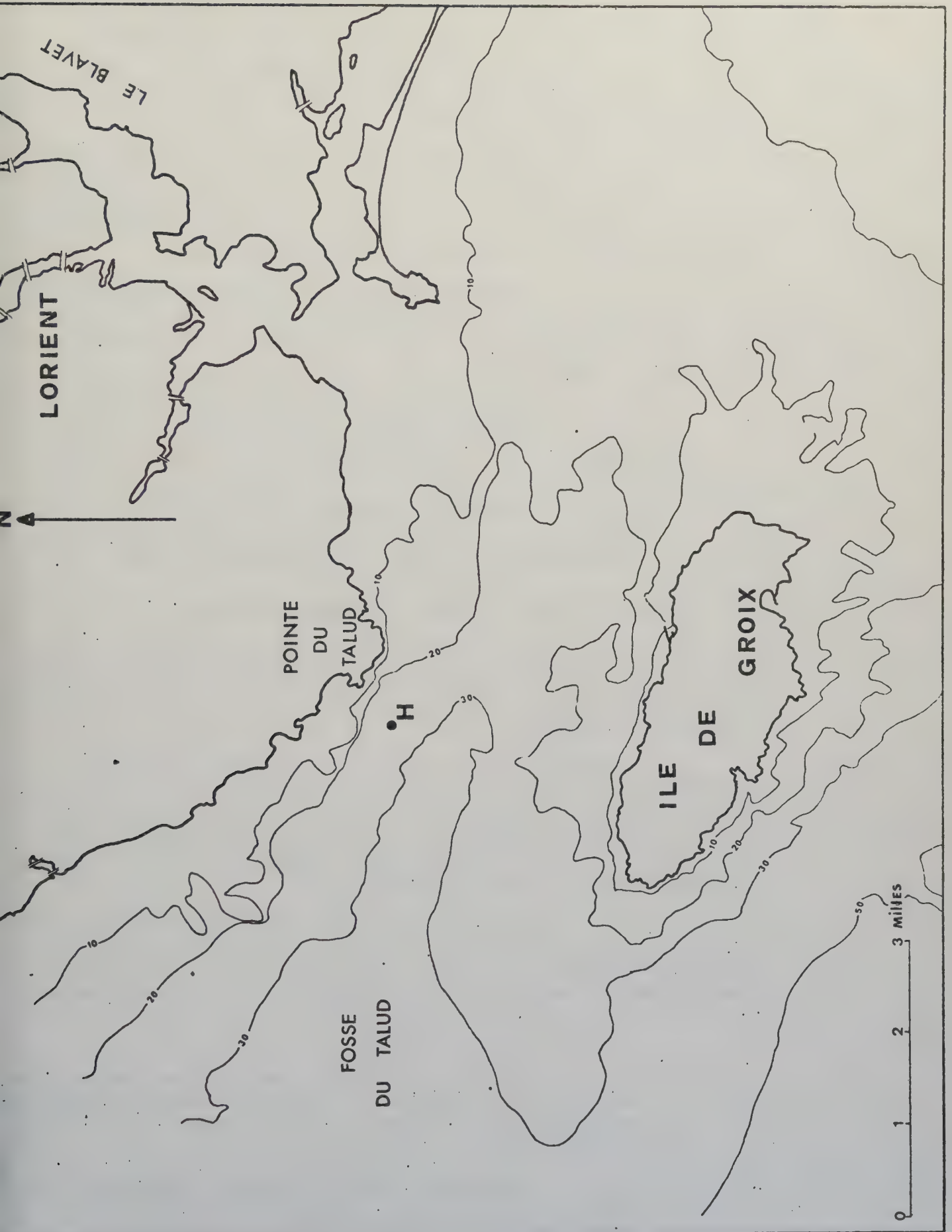
- une zone d'épanouissement des isobares
- une zone d'inflexion des isobares
- un front, chaud ou froid
- une côte.

Si, dans une zone océanique quelconque, un vent constant et durable souffle dans la direction du point de mesure H, situé près de la côte, le fetch est, dans cette direction, la longueur interceptée par les fronts avant et arrière de l'aire de génération. La longueur comprise entre le front avant et le point H s'appelle le "Decay", (littéralement "pourrissement"). Ce dernier terme indique assez bien que la houle, maximum au départ du front avant, va s'affaiblir tout au long du "Decay".

3 - 1 - 3 - 2 - Conditions Météorologiques durant la mesure.

Dans la troposphère qui recouvre l'Atlantique Nord, deux surfaces de discontinuité principales séparent l'air "tropical" de l'air "polaire". C'est sur ces fronts "polaires", situés en moyenne le long du 50° parallèle, que se développent des familles de perturbations, typiques de la météorologie de cette région. Ces cyclones qui naissent "en vague" sur un front polaire, sont donc situés en gros, au niveau du 50° parallèle. La circulation des vents autour de ces centres de basse pression étant inverse du sens des aiguilles d'une montre, on trouvera donc assez souvent, associées à ces dépressions, des aires de génération de houle intéressant l'Ouest de la France, et situées au Sud de ces dépressions, soit entre les 40° et 50° parallèles.

FIG 3.1



Situation du Point de mouillage du houlographe (H)

Ces cyclones sont le plus souvent très évolutifs, et les fetchs associés seront donc eux aussi mobiles (les "moving fetches" des auteurs américains). Ainsi, pendant les deux mois de la mesure, aucune situation dépressionnaire vraiment stable ne s'individualisera.

De plus, à vitesse et durée du vent égales, une houle sera d'autant plus forte au point de mesure qu'elle aura été formée plus près des côtes (houle maximum pour un decay nul).

Il faut donc noter que pendant ces deux mois, on ne trouvera jamais un fetch limité par la côte (mis à part évidemment les "fetchs" de quelques milles des vents locaux).

En somme, on trouve là des conditions météorologiques très variables, sans aucun événement marquant, donnant assez bien l'idée d'une situation moyenne.

3 - 2 - Description des Résultats - Analyse statistique

Le dépouillement du film de houlographe fut confié au Laboratoire National d'Hydraulique. Ce dernier utilisa une méthode simplifiée de comptage, basée sur l'assimilation du spectre des amplitudes à un spectre de Rayleigh (1880).

On obtient ainsi un tableau des creux* et des périodes des différents harmoniques de la houle en fonction du temps. Une représentation graphique (les figures 3-2 et 3-3 les résument) y était jointe. Des trois caractéristiques habituelles de la houle, direction, amplitude, période, seule manquait par conséquent la direction, qui n'est pas fournie par l'appareil utilisé.

C'est la direction au large qui est importante et non celle au point de mesure situé près de la côte ; en effet, la réfraction des houles tend à rendre les crêtes parallèles au rivage. La direction au large permet par contre de déceler l'origine de la houle considérée.

3 - 2 - 1 - Directions :

Elles furent fournies par le Sémaphore du Talut (à Belle-Ile). Ce sont les directions des houles du large, observées durant les deux mois de la mesure à 6h, 12h, 18h T.U.

Sur les 168 observations ainsi recueillies, on note :

* Le creux ou hauteur H est relié à l'amplitude a par la relation :

$$H = 2a.$$

Variation des deux périodes principales de la houle en un point (H)
durant deux mois de printemps

MESURES de HOULE

DUREE : 24.4.68 au 18.6.68

LIEU : TA.31

DEPOUILLEMENT : L.N.H

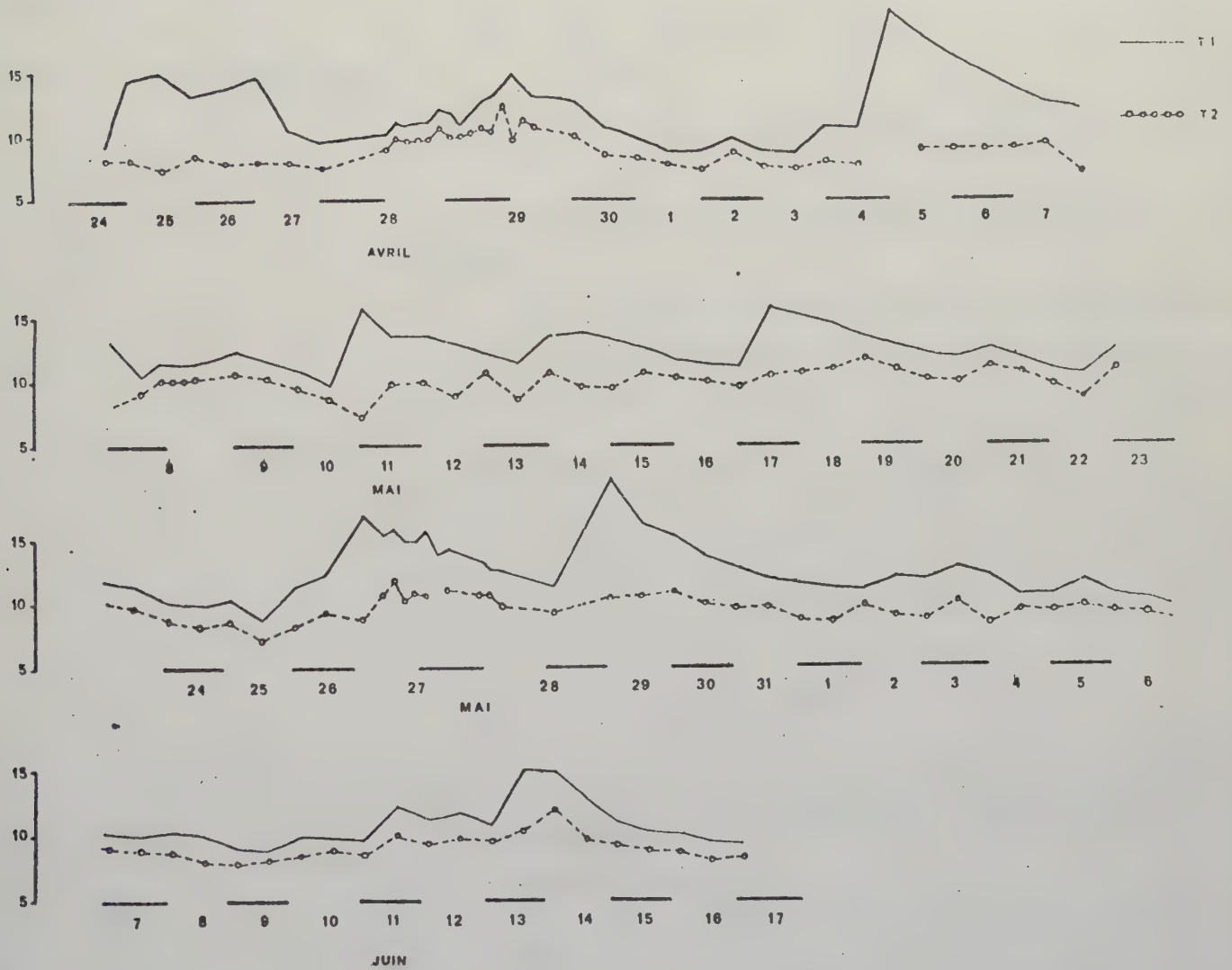


FIG 3.3

Hauteurs de houle en un point durant deux mois de printemps

MESURES de HOULE

DUREE : 24.4.68 au 18.6.68

LIEU : TA.31

DEPOUILLEMENT : L N H

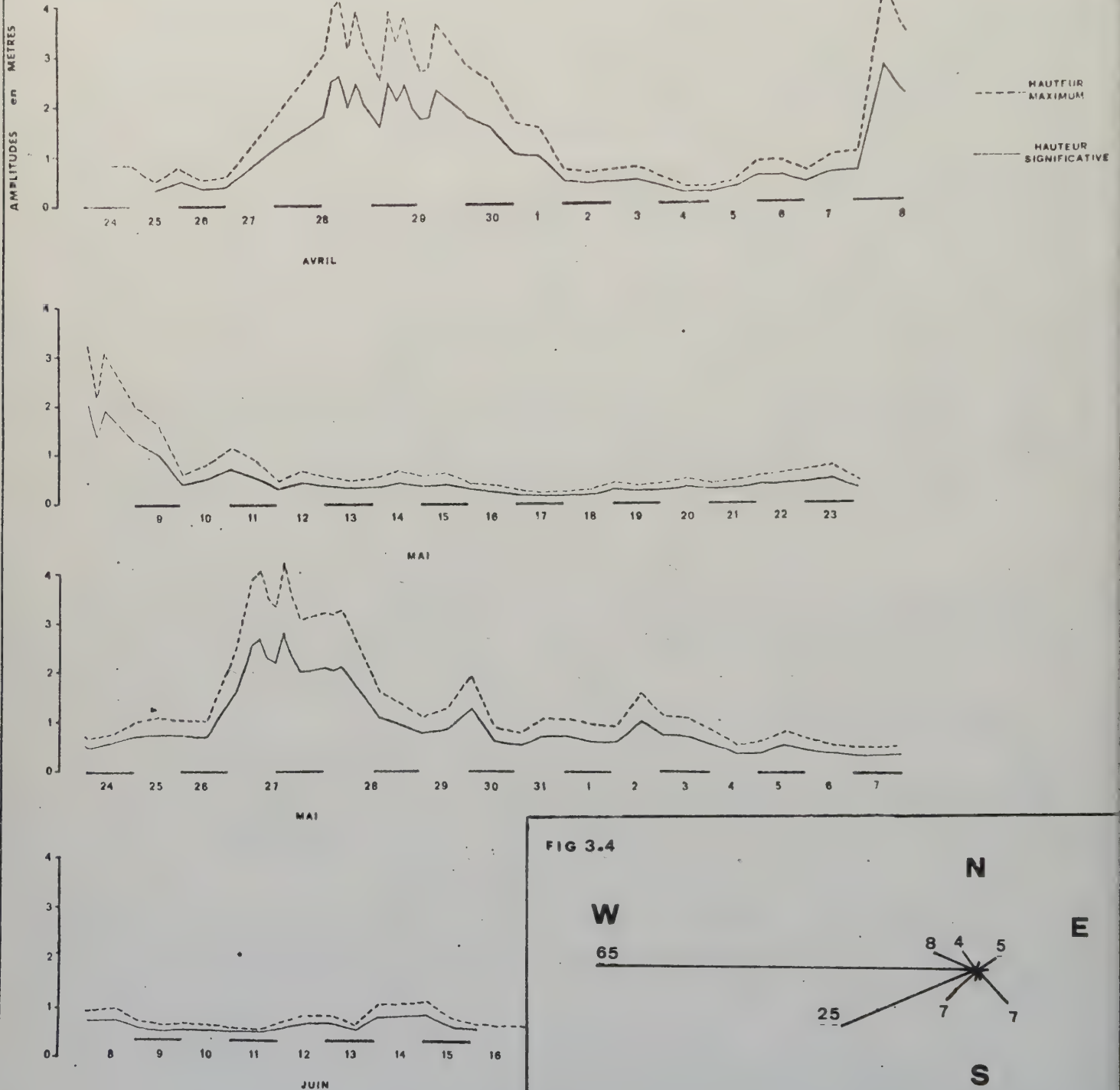
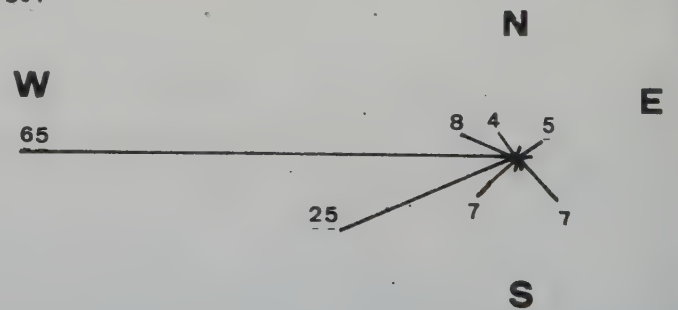


FIG 3.4



Direction de la houle à Belle-Ile
durant la même période

Nombre d'observations suivant les
directions

<u>Secteur Est</u>	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
	0	0	1	5	3	0	7	1	2
<u>Secteur Ouest</u>	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
	2	0	7	25	65	8	4	1	0

Dans 37 cas la direction n'a pu être clairement discernée.

Ces résultats sont représentés sur la figure 3-4.

Les houles d'Ouest sont évidemment les plus nombreuses, suivies par celles en provenance de l'Ouest-Sud-Ouest.

Dans le secteur Est, la protection n'est pas totale, et la proportion des houles de Sud-Est montre bien qu'il faut s'attendre à des surprises de ce côté. Hélas, la situation du point de mesure, à l'abri de l'Ile de Groix, par rapport aux houles de ce secteur, ne permettra pas de tenir compte de leur influence.

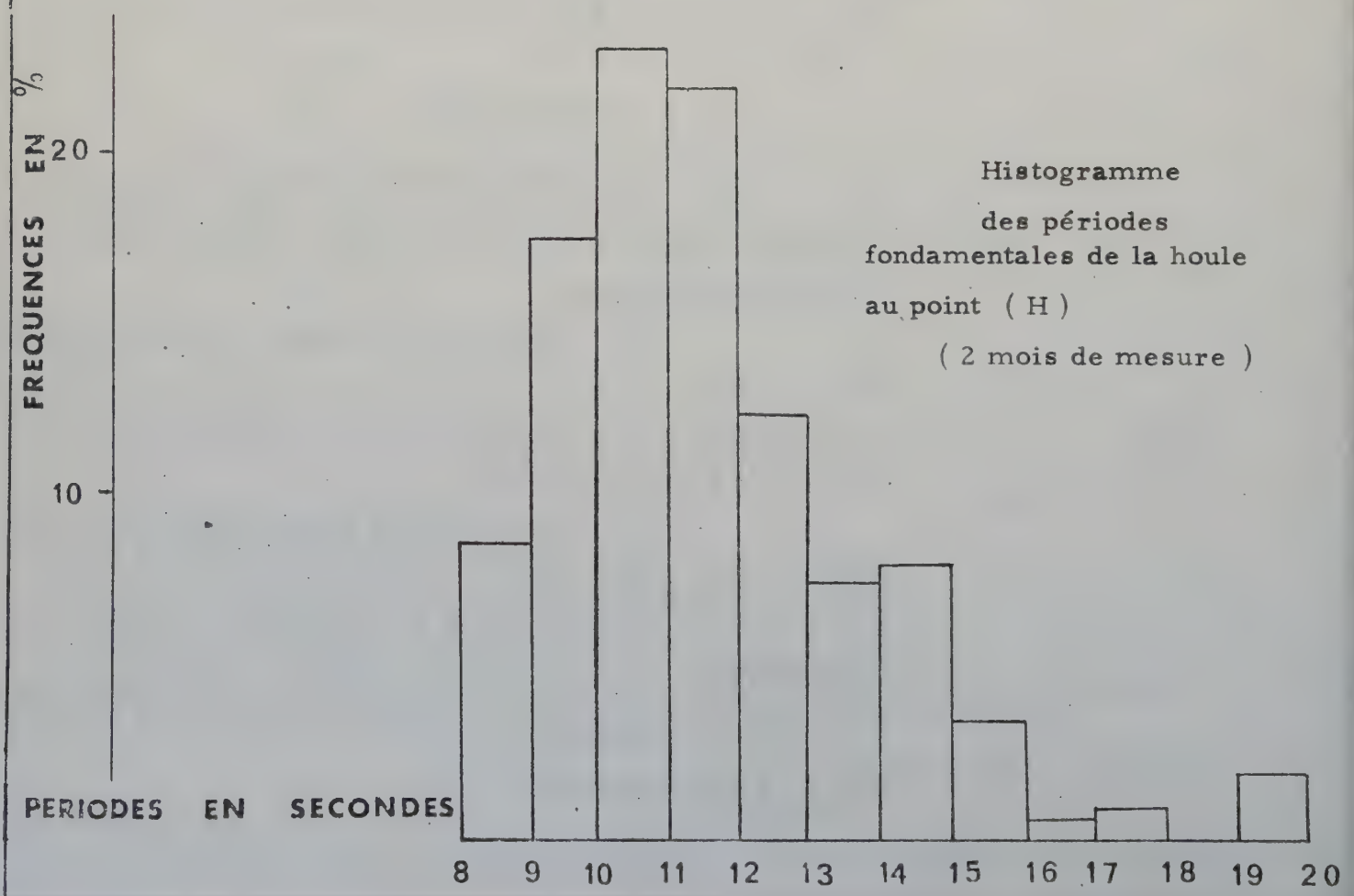
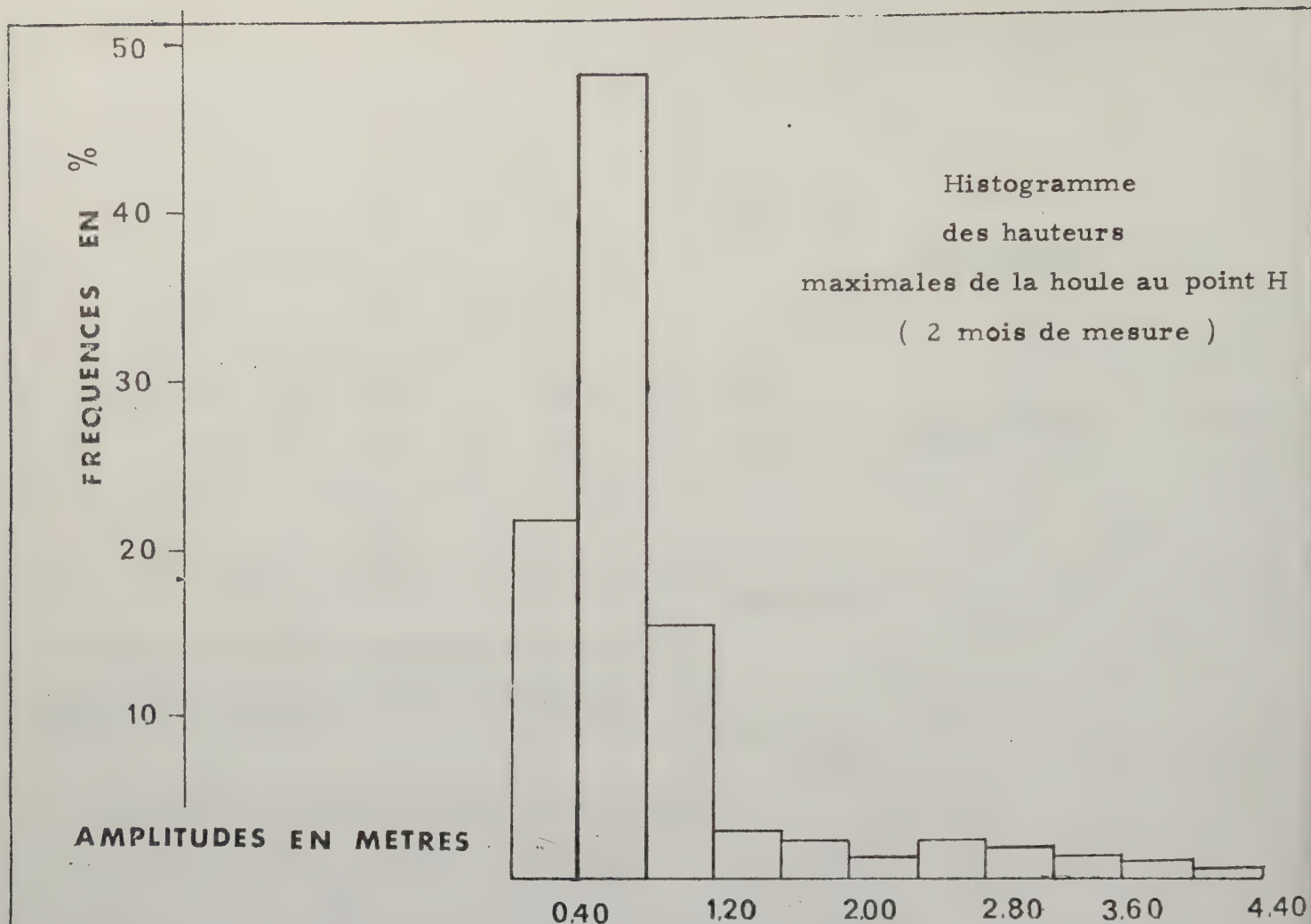
3 - 2 - 2 - Périodes :

Deux périodes distinctes (rarement trois) apparaissent dans les enregistrements. L'une d'elle T_1 (la plus longue) correspond le plus souvent à la houle d'amplitude maximale.

Seules ces périodes T_1 seront étudiées ici.

La figure n° 3-2 représente les variations des périodes en fonction du temps. Les valeurs sont étalées de 8 à 20 secondes.

Les mesures de périodes ont lieu toutes les douze heures (toutes les deux heures durant les tempêtes). On peut donc affecter à chaque mesure un poids égal à l'intervalle de temps où cette mesure est supposée représentative de la réalité. Si de plus on répartit les périodes en classes d'une seconde, on peut, pour chaque classe T_n cumuler les intervalles de temps (en heures) où cette valeur T_n a été rencontrée.



Le rapport de ce temps cumulé au temps total fournit les fréquences (en %). On trace donc un histogramme représenté sur la figure 3-5.

A première vue, on pourrait le croire caractérisé par deux modes :

- un mode principal correspondant à la classe 10-11 secondes.
- un mode secondaire correspondant à la classe 14-15 secondes.

Mais, il convient de s'assurer que ces modes ne sont pas accidentels et liés à la brièveté de la mesure.

Pour cela, on peut porter sur un graphique (voir figure 3-6) en regard de chaque classe de période la fréquence des observations inférieures à cette période, donnée ; c'est une courbe cumulative ; on sait qu'en utilisant pour échelle des ordonnées, l'échelle de probabilités, toute répartition gaussienne sera représentée par une droite. Ici, on ne peut guère tracer un élément de droite qu'autour du premier mode. Ainsi, rien ne prouve qu'avec une mesure plus longue on retrouve encore le mode secondaire à 14-15 secondes.

3 - 2 - 3 - Hauteurs :

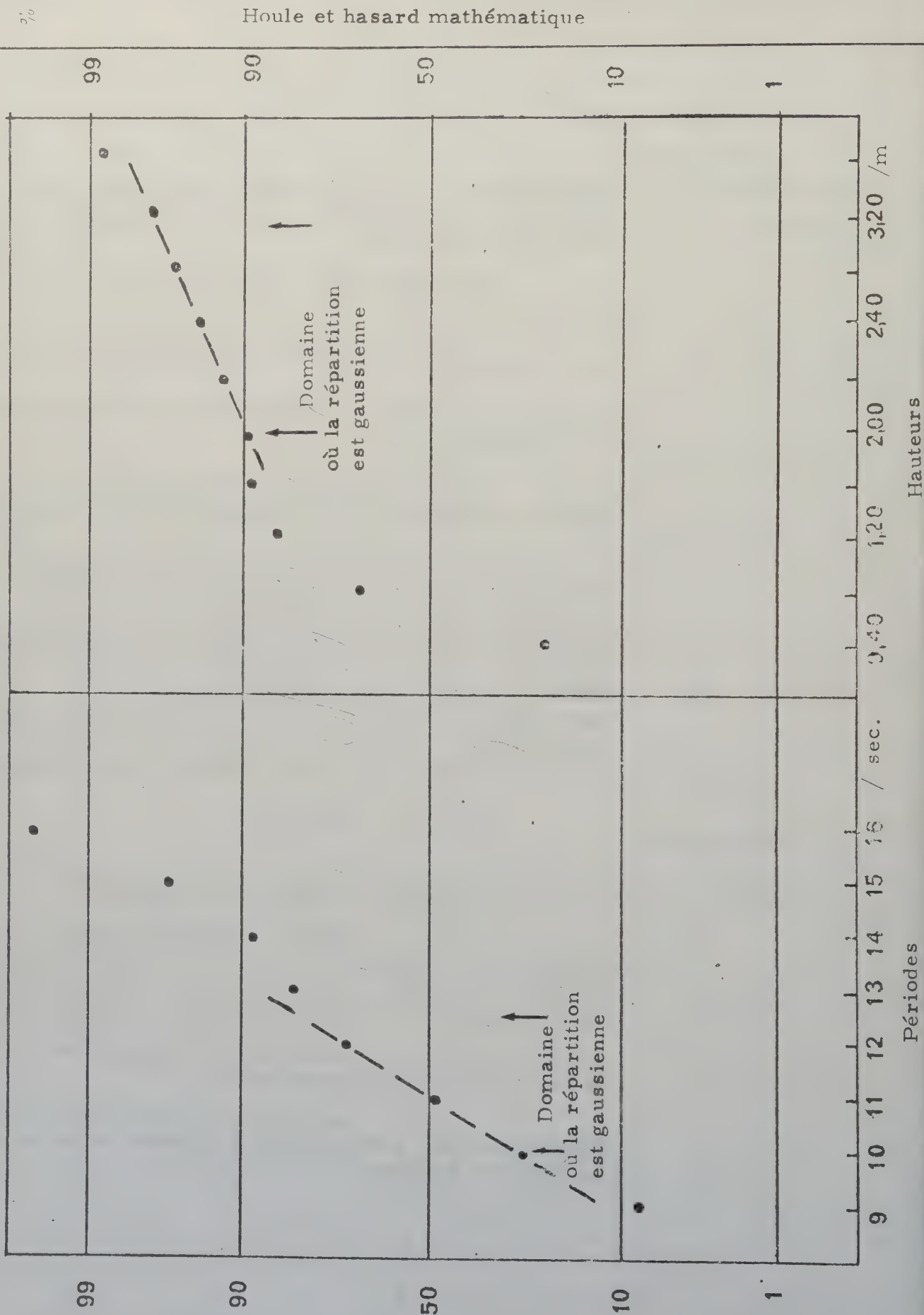
Un histogramme analogue (voir figure 3.5 bis) permet de traiter les hauteurs maximum.

Dans le domaine des petites amplitudes, la distribution semble suivre une loi de Poisson plutôt qu'une loi de Gauss. Ainsi, les houles les plus fréquentes (près de 50 %) sont parmi les plus faibles (0,40 - 0,80 mètre).

Toutefois, à la classe 2,40 - 2,80m, on peut déceler un léger maximum.

La courbe cumulative en ordonnées gaussiennes (fig. 3-6) confirme l'existence de ce mode entre 2,00 et 3,20 mètres.

: Courbes cumulatives en ordonnées gaussiennes des fréquences de périodes
et hauteurs de la houle.



3 - 2 - 4 - Corrélations - Prévisions :

Une table de corrélation (fig. 3-7) montre bien qu'il est difficile d'associer une période donnée à un creux donné. La fréquence maximum est 11 % pour des houles caractérisées à la fois par des périodes 10-11 secondes et des hauteurs 0,40 - 0,80 mètre.

LARRAS (1967) a proposé une loi de répartition statistique des houles :

$$P(H) = e^{- (H/K)} \quad \text{ou} \quad H = -K \text{ Log. } P$$

K étant un coefficient caractéristique du point de mesure,

P(H) étant la probabilité pour la houle de dépasser la hauteur H.

MAYENÇON (1969), en étudiant les données de huit années d'observations de navires, compilées par le Service Météorologique Britannique, a découvert lui aussi une formulation exponentielle comparable.

Il est intéressant de voir si cette loi est vérifiée ici. Pour cela, on peut, en première approximation et pour une hauteur H_1 donnée, assimiler à $P(H_1)$ le pourcentage d'heures pendant lesquelles cette hauteur H_1 a été dépassée.

En prenant comme valeurs de H celles qui délimitaient les classes de l'histogramme 3.5bis, on peut donc associer à chacune une valeur de P et calculer la corrélation existant entre ces deux séries (Voir tableau 3-8).

On trouve comme coefficient de corrélation :

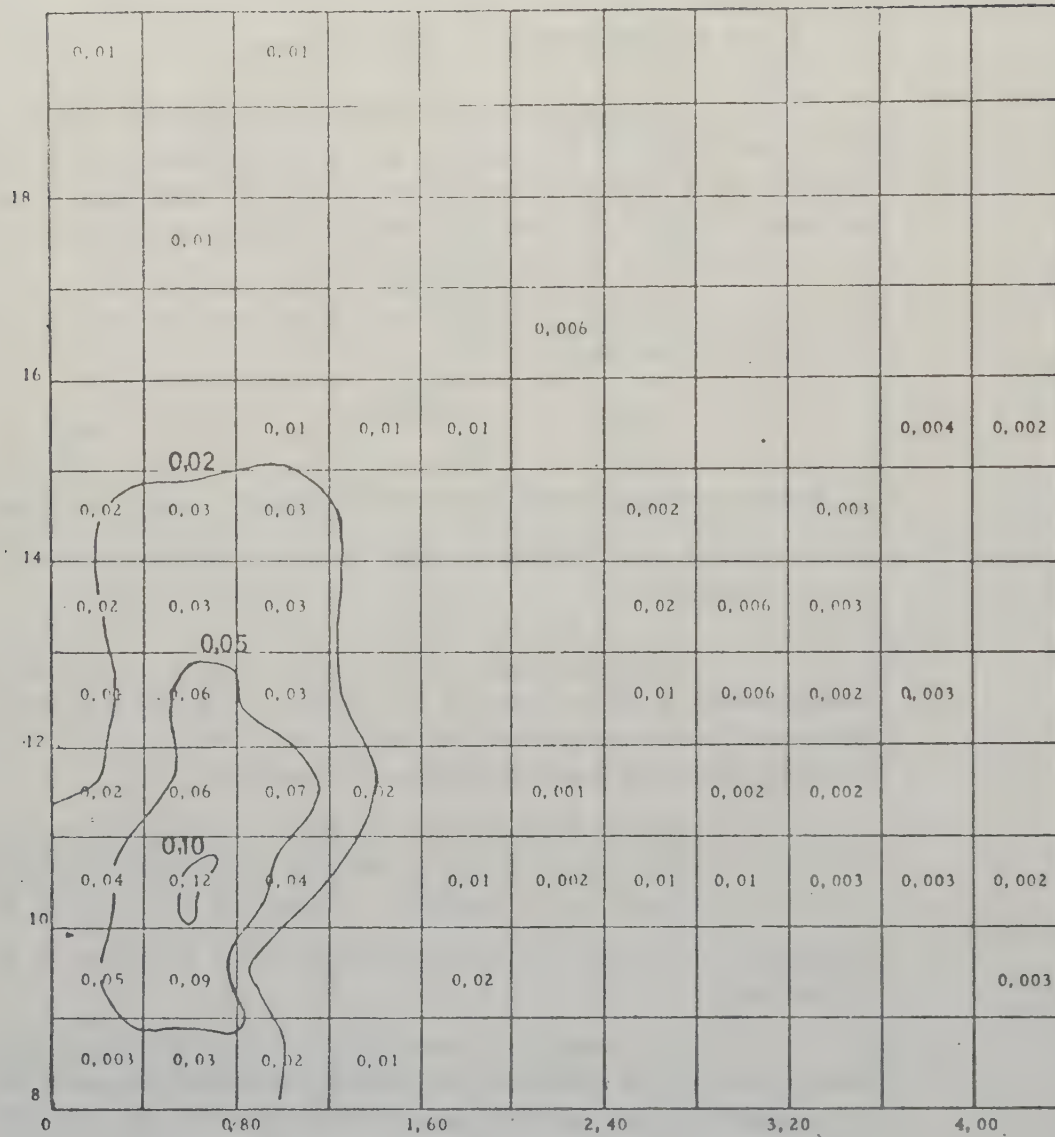
$$\underline{r = 0,97}$$

C'est une valeur proche de l'unité, mais suffisamment différente cependant, pour que les deux droites de régression de H en P et P en H (voir figure 3-9) soient nettement distinctes.

Si, comme elle semble l'être, cette Loi de LARRAS est vérifiée, on pourrait, en transformant l'occurrence horaire en occurrence journalière, connaître les plus fortes houles "annuelle", "décennale", "centenaire" de probabilité 1/365, 1/3650 et 1/36 500.

FIG 3.7

Périodes
en secondes.



Amplitudes Maximales
en mètres.

: Table de corrélation entre périodes et amplitudes maximales.

Corrélation entre Hauteurs des houles (H) et Probabilité d'occurrence (P)

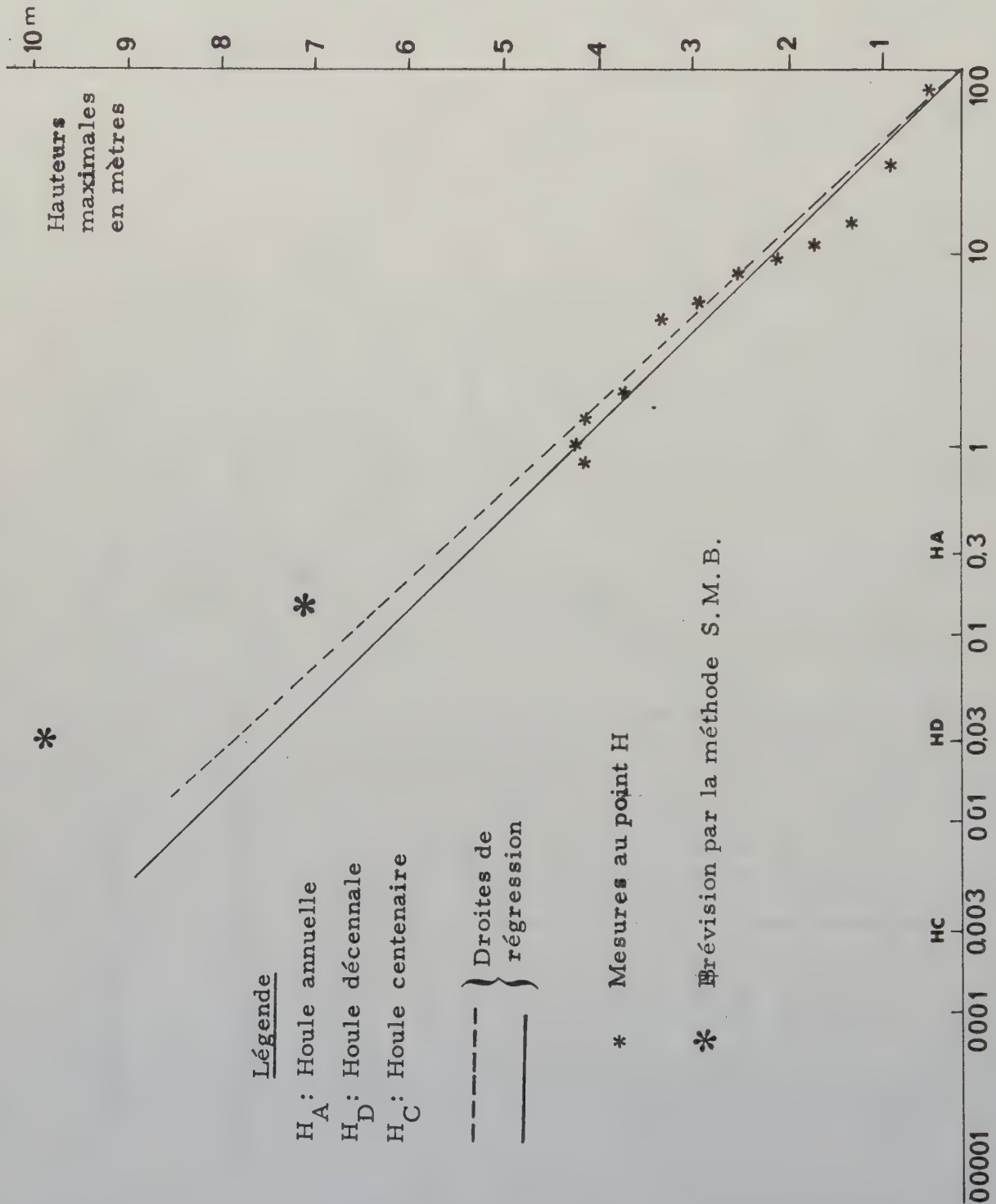
i	h _i	p _i	H _i = h _i - h		P _i = p _i - p		H _i ²	P _i ²	H _i P _i
			-	+	-	+			
1	0,40	- 0,11	1,8				3,24	0,98	- 1,78
2	0,80	- 0,52	1,4				1,96	0,34	- 0,81
3	1,20	- 0,83	1,0				1,0	0,07	- 0,27
4	1,60	- 0,93	0,6				0,36	0,03	- 0,10
5	2,00	- 1,02	0,2				0,04	0,01	- 0,02
6	2,40	- 1,10		0,2			0,04	0	0
7	2,80	- 1,25		0,6	0,15		0,36	0,02	- 0,09
8	3,20	- 1,44		1,0	0,34		1,0	0,12	- 0,34
9	3,60	- 1,72		1,4	0,62		1,96	0,38	- 0,87
10	4,00	- 2,10		1,8	1,00		3,24	1,00	- 1,80
T	22,00	- 11,02	5,0	5,0	2,11	2,09	13,20	2,95	- 6,08

Les coefficients de régression sont : $k = \frac{\sum_{i=1}^{10} H_i P_i}{\sum_{i=1}^{10} H_i^2} = - 0,46$ $k' = \frac{\sum_{i=1}^{10} H_i P_i}{\sum_{i=1}^{10} P_i^2} = - 2,06$

Le coefficient de corrélation est : $r = k.k' = 0,97$

: Calcul des coefficients de régression et de corrélation.

Probabilité d'occurrence d'une houle de hauteur maximale donnée
au point H



PROBABILITE EN POURCENTAGE (échelle logarithmique)

Tout cela serait fondé sur une observation bien courte, et il paraît raisonnable d'analyser auparavant le phénomène afin de le rattacher à des causes physiques mieux connues et pour lesquelles on dispose déjà de statistiques sur des périodes étendues.

3 - 3 - Rattachement de la houle mesurée à la houle du large ^{* A}

3 - 3 - 1 - Problème de la réfraction :

On a porté, sur un même graphique (3-10),

- . d'une part, les hauteurs significatives ^{* B} mesurées à la côte, les 10 et 11 Mai 1968 ;
- . d'autre part, les hauteurs significatives calculées au large d'après les données météorologiques par la méthode S.M.B. (Voir plus loin, paragraphe 3-4-1).

On constate un écart inhabituel.

Or, les aires de génération de houle de ces deux jours sont toutes situées dans le Nord-Ouest de la péninsule armoricaine ; les houles formées sont donc susceptibles de réfraction.

Si l'on veut relier les houles à la côte aux houles du large, le phénomène de réfraction doit donc être étudié pour les secteurs les plus importants et l'atténuation correspondante doit pouvoir être chiffrée.

3 - 3 - 2 - Méthode utilisée - Résultats :

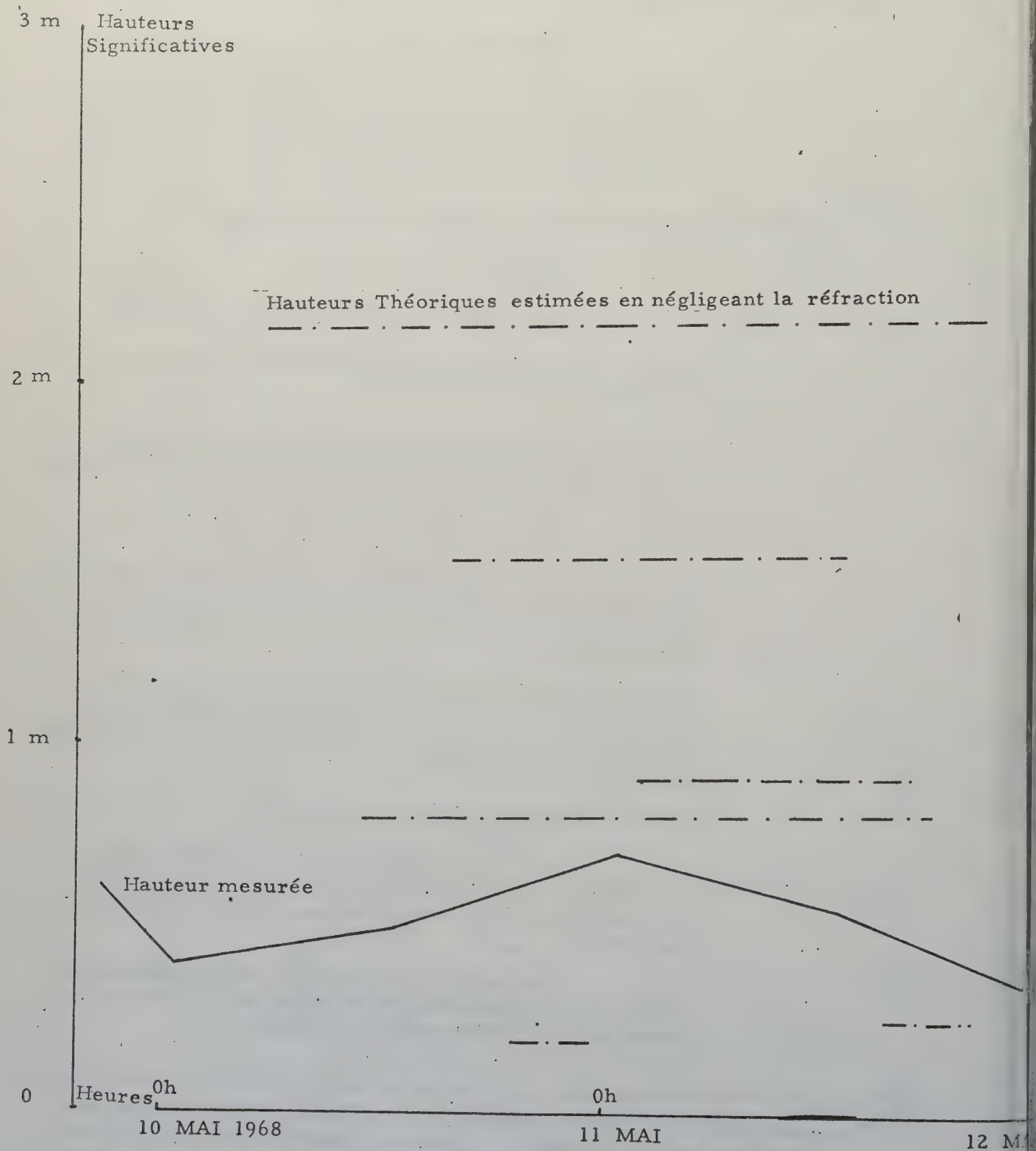
C'est une méthode graphique qui fut choisie. LACOMBE (1953) a montré les avantages du tracé direct des orthogonales sur les classiques procédés de tracé des crêtes.

Les tables et l'abaque de BRETSCHNEIDER (1966) furent employés pour le calcul des coefficients de réfraction et la construction elle-même.

* A - Les parties 3-3 et 3-4 concernant la réfraction et la prévision des houles n'ont été possibles que grâce au travail énorme de mon ami Ph. JALLADEAU, dont la compétence m'a ouvert bien des horizons.

* B - Dans une population de 100 vagues, la hauteur significative est la hauteur moyenne des trente-trois plus grosses vagues.

IMPORTANCE DE LA REFRACTION



Trois houles typiques furent ainsi étudiées, de trois origines différentes :

- Nord-Ouest
- Sud-Ouest
- Ouest-Sud-Ouest.

3 - 3 - 2 - 1 - Houles du Nord-Ouest (Fig. 3-11)

On peut la définir ainsi :

DIRECTION	: NORD-OUEST
Coordonnées de l'aire de génération	: 33° Nord - 20° Ouest
Arrivée prédite	: le 10 Mai à 05h T.U.
Caractéristiques calculées au large (Méthode S. M. B.)	) Période : 13 " (Longueur d'onde : 267 mètres) Hauteur significative : 2,15 mètres.
Hauteur significative calculée à l'arrivée (d'après l'espacement des orthogonales)	) (0,12 mètre.)
Caractéristiques enregistrées à la côte le 10 Mai à 05h	) Périodes : 8 et 9 " (Hauteur significative : 0,50 mètre.

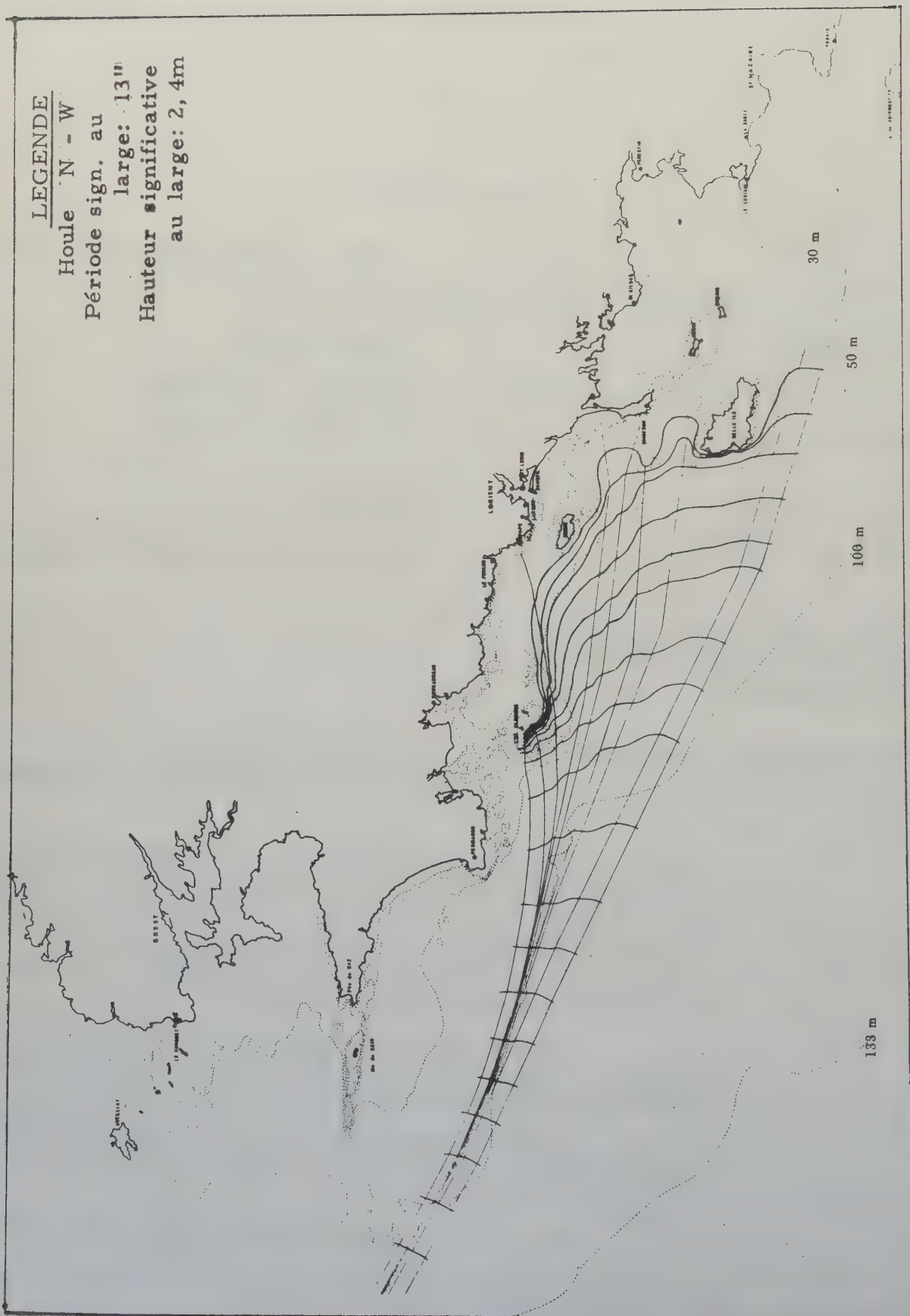
La faible sensibilité de l'appareil ne permet pas de retrouver à l'arrivée cette houle du Nord-Ouest de période 13" et d'environ 10 cm de creux. Par contre, on enregistre des houles de périodes plus faibles et de hauteurs plus importantes. Elles sont issues d'autres aires de génération, car leur direction observée au large est Ouest-Sud-Ouest.

On peut donc, en première approximation, considérer que l'effet des houles du Nord-Ouest est pratiquement annulé par la réfraction, dans cette partie du littoral.

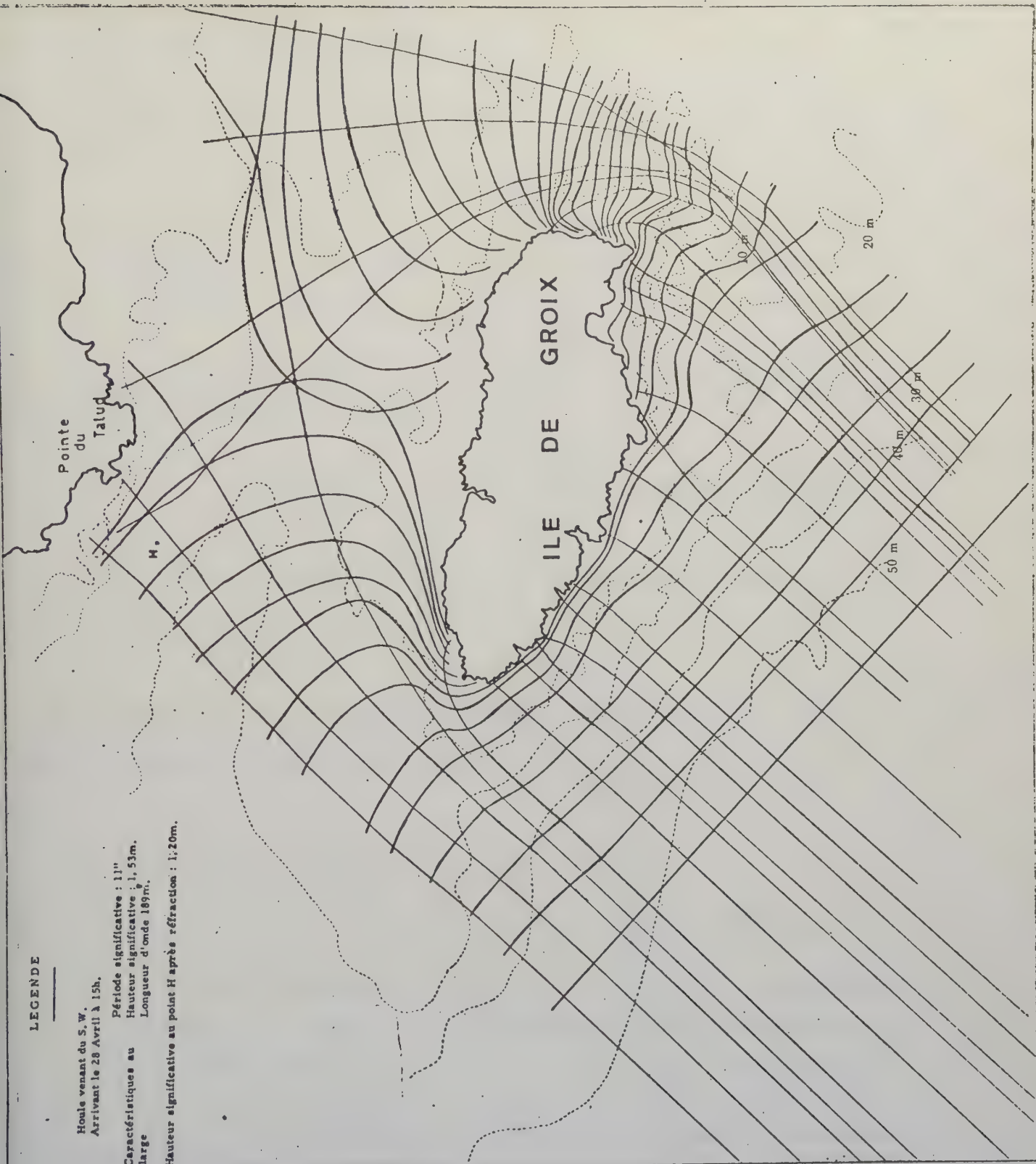
C'est l'archipel des Glénans qui, par sa position très méridionale, assure une aussi bonne protection.

3 - 3 - 2 - 2 - Houles du Sud-Ouest (Fig. 3-12)

Ses caractéristiques sont les suivantes :



- Orthogonales et plan de vague d'une houle N.W.



LEGENDE

Houle venant du S. W.
Arrivant le 28 Avril à 15h.

Caractéristiques au large
Période significative : 11"
Hauteur significative : 1,53m.
Longueur d'onde 189m.

Hauteur significative au point H après réfraction : 1,20m.

Orthogonales et plan
de vague d'une houle
de Sud-Ouest.

DIRECTION	: SUD OUEST
Coordonnées de l'aire de génération	: 45° Nord - 08° Ouest
Arrivée prédite	: le 28 Avril à 09h T.U.
Caractéristiques calculées au large	) Période : <u>11 "</u> (Longueur d'onde : 189 mètres) Hauteur significative : 2,17 mètres.
Hauteur significative calculée à l'arrivée	) (1,10 mètre.
Caractéristiques enregistrées à la côte	) Périodes : 8 - 9 et <u>11 "</u> () Hauteurs : 1,10m à 00h 30 (1,75m à 12h 30

Le phénomène important est ici le rôle joué par l'Ile de Groix. Les réfractions sur les pointes Ouest et Est sont spectaculaires ; surtout, il y a formation d'une zone d'abri au Nord de l'Ile.

3 - 3 - 2 - 3 - Houles de Ouest-Sud-Ouest (Fig. 3-13)

Ses caractéristiques sont les suivantes :

DIRECTION	: OUEST-SUD-OUEST
Coordonnées de l'aire de génération	: 47° Nord - 07° Ouest
Arrivée prédite	: le 30 Avril à 18h T.U.
Caractéristiques calculées au large	) Période : 8,7" (Longueur d'onde : 116 mètres) Hauteur significative : 2,80 mètres
Hauteur significative calculée à l'arrivée	) (0,70 mètre.
Caractéristiques enregistrées à la côte	) Périodes : 10,3 et <u>8,3 "</u> (Hauteur significative : 1,30 mètre.

Fig. 3-13

Orthogonales d'une
houle W-SW.

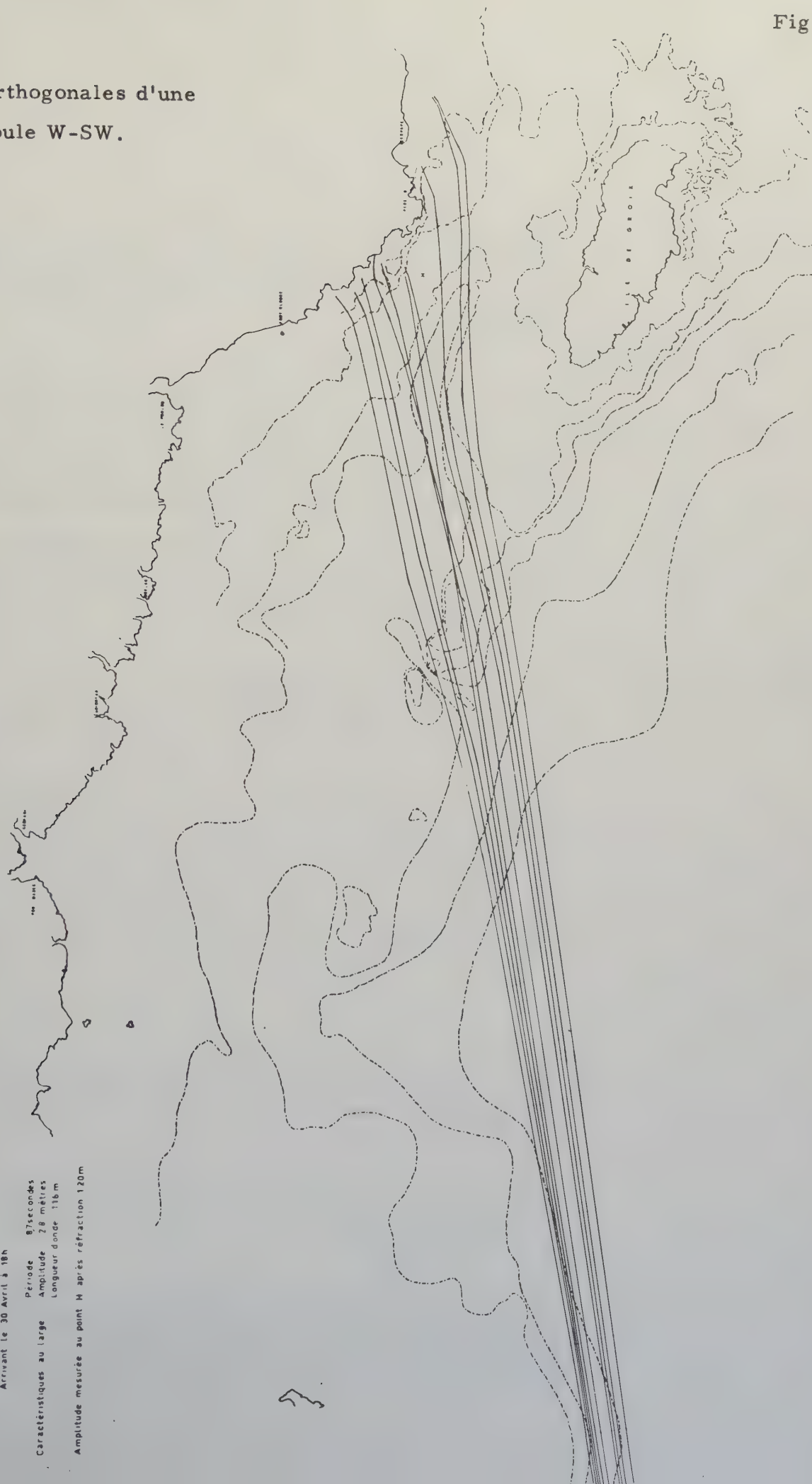
LEGENDE

Houle venant de W S W

Arrivant le 30 Avril à 18h

Caractéristiques au large
Période 87 secondes
Amplitude 2,8 mètres
Longueur d'onde 116 m

Amplitude mesurée au point M après réfraction 120m



Cette houle théorique dont la réfraction est représentée ici paraît s'identifier à l'harmonique de période 8,3 secondes qui est enregistrée au point de mesure. Cependant, il s'y superpose une houle de période 10,3 secondes et de hauteur plus grande.

La Fosse du Talud, pour des houles venant de cette direction est abordée "en bout". Les orthogonales ont donc tendance à diverger et l'on obtient des resserréments de part et d'autre de cette vallée sous-marine. Autrement dit, l'amplitude de la houle a tendance à augmenter en bordure de cette vallée et à diminuer dans son axe médian.

On notera, par contre, avec attention, des concentrations de houle sur le littoral, à l'Ouest de cette même pointe. Ces concentrations ont des emplacements variables avec la période de la houle.

3 - 3 - 3 - Réfraction et Courants :

La réfraction est en quelque sorte une répartition géographique de l'énergie de la houle.

Le déplacement des lames peut être considéré comme la projection d'une certaine masse d'eau dans la direction de propagation. Lorsque les crêtes sont obliques par rapport à la côte, ce mouvement admet une composante parallèle au rivage, qui provoque les "long-shore currents". Or, la vitesse d'entraînement en surface u , est proportionnelle au carré de la cambrure γ et à la célérité c .

$$u = \pi^2 \cdot \gamma^2 \cdot c \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{2a}{\lambda} = \frac{H}{\lambda}$$

Dans les zones de convergence des orthogonales ces "long-shore currents" sont donc maximum et tendent à se diriger vers les zones où ces orthogonales s'épanouissent (LACOMBE, 1965).

Ainsi, par houles d'Ouest-Sud-Ouest, les plus fréquentes, il se forme un tel courant dirigé de la pointe du Talud vers l'Est, et situé évidemment entre le déferlement et le rivage.

En Fosse du Talud, on peut raisonnablement s'attendre à un phénomène de compensation analogue. La zone de calme relatif, située dans l'axe de la Fosse, pourrait être ainsi par houles d'Ouest, le siège de courants portants au large.

Le long du rivage lui-même, l'existence des "long-shore currents" paraît moins certaine ; elle n'est en tous cas nullement démontrée par les plans de houle.

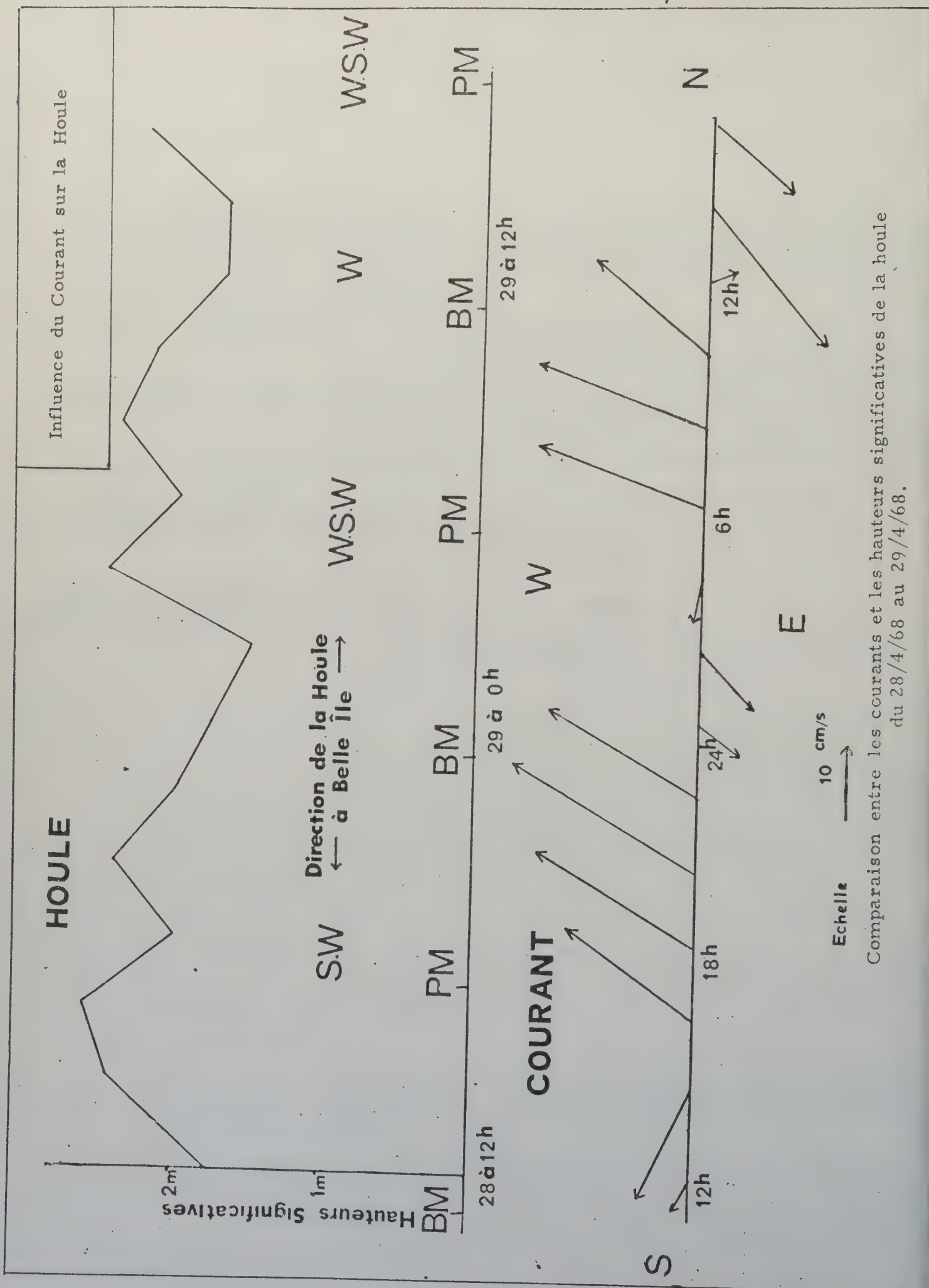
A peine par temps de Sud-Ouest l'obliquité des crêtes par rapport au rivage Pointe du Talud - Lorient laisse-t-elle soupçonner un mouvement d'eau possible.

Inversement, les courants de marée, de dérive ou de pente, peuvent avoir une action sur la hauteur de la houle.

La figure 3-14 présente une telle comparaison.

On n'y retrouve aucun signe net de gonflement des vagues par un courant de sens contraire à leur direction de propagation.

Mais, en ce point, les valeurs de courant sont faibles ; dans les passes, avec des jusants de deux ou trois noeuds, il est possible que les lois de SUTHONS (1943) trouvent quelque vérification.



3 - 4 - Corrélations Houle-Météorologie

en un point donné de la côte -

Durant l'enregistrement de houle du 24 Avril 1968 au 18 Juin 1968, il se produisit trois tempêtes. Les deux premières sont notables en ce qu'elles eurent lieu par des situations météorologiques très courantes : vent faible, fetchs peu importants, dépressions très mobiles. Il paraissait intéressant d'essayer de comprendre ce mécanisme et d'étudier à fond la première, par exemple.

3 - 4 - 1 - Reconstitution de la tempête du 28 Avril :

Pour relier les éléments de cette houle à ceux de la météorologie, une tempête fut reconstituée avec les diverses houles "théoriques", calculées sur les renseignements des Bulletins Quotidiens d'Etude de la Météorologie Nationale. Pour cela, c'est une méthode prévisionnelle qui fut choisie.

Il paraît paradoxal, à priori, d'effectuer une prévision de phénomènes passés, mais ce procédé est souvent fructueux.

En effet, si les résultats se rapprochaient fortement de la réalité, on pouvait estimer que la houle du lieu et la situation météorologique se reliaient quantitativement, et en tirer d'après un examen des cartes météorologiques couvrant une année, une estimation de la plus forte houle annuelle.

La méthode prévisionnelle employée fut la méthode S.M.B. (Sverdrup, Munk, Bretschneider) ; les calculs furent effectués avec les tables et abaques BRETSCHNEIDER (1966).

Bien que paraissant démodée par rapport aux méthodes de dispersion spectro-angulaire, la méthode S.M.B. présentait deux avantages :

- elle permettait d'utiliser comme documents météorologiques de simples Bulletins Quotidiens d'Etude,
- surtout, en faisant intervenir la notion d'aire de génération de la houle, elle fournissait les données précises sur les directions de propagation et permettait de tenir compte d'affaiblissements différenciés par la réfraction.

3 - 4 - 2 - Résultats :

La méthode est simple pour une situation très caractéristique, une dépression stationnaire, par exemple. Dans le cas actuel de cyclones très mobiles, des aires de générations de houles se déplacent de même, et des houles déjà formées pourront être intégrées dans un nouveau système. Le tableau en annexe montre assez bien la complexité des calculs des houles issues de "moving fetches".

Pour chaque houle bien individualisée, on détermine ainsi :

- sa hauteur significative au large, ou plutôt avant réfraction ;
- sa période ;
- son heure d'arrivée (on a négligé, pour ce calcul, la modification de la célérité due à la réfraction).

Afin de comparer au point de mesure, hauteur théorique et hauteur mesurée, il est nécessaire de faire intervenir un coefficient d'affaiblissement dû à la réfraction.

Ce coefficient va différer suivant la direction et la période des houles considérées.

Mais deux observations vont faciliter l'interprétation :

- la majorité des périodes de houles de cette tempête se groupent entre 8 et 11".
- l'éventail des directions est très réduit : du Sud-Ouest au Nord-Ouest.

En première approximation, on a donc adopté les coefficients moyens suivants :

Houle du Sud-Ouest	: k = 0,8
Houle Ouest-Sud-Ouest	: k = 0,5
Houle d'Ouest	: k = 0,2

Les houles du Nord-Ouest ont été négligées. (voir paragraphe 3.3.2.1).

En portant sur un graphique (fig.3.15) dont l'abscisse est le temps et l'ordonnée la hauteur significative après réfraction, les résultats corrigés du tableau, on obtient une accumulation de petits segments représentatifs d'un grand nombre de houles de faible amplitude. Ces houles semblent avoir bien peu de rapports avec la houle mesurée.

Mais, en additionnant, pour chaque heure, les hauteurs des houles théoriques supposées à cet instant, on constate :

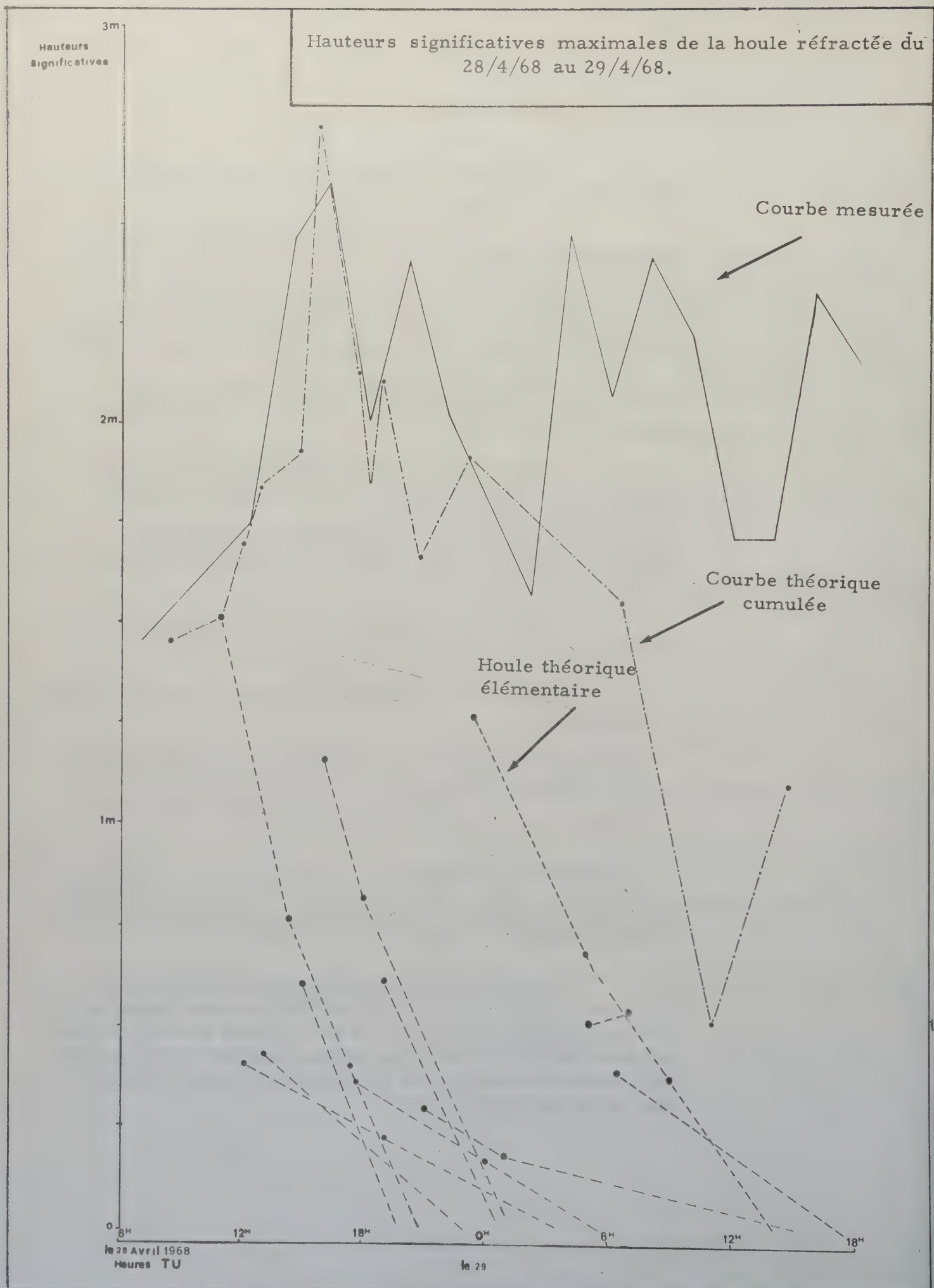
1) que pour la période du 28 Avril, à 9h, au 29 Avril, à 3h, on obtient une courbe théorique qui est très proche de la courbe de mesure. C'est là, simplement, une vérification de l'application à la houle du principe de superposition des petits mouvements (LARRAS, 1961).

2) qu'à partir du 29 Avril, la différence est considérable entre houle reconstituée et houle réelle.

En examinant de plus près cette dernière période, on remarque :

- que les houles calculées sont très courtes, leurs périodes sont petites ; on note le 29 à 16 heures : $3,6''$ - $5,25''$ - $5,86''$ - $5,5''$ - $7,4''$ - $7,42''$. Les coefficients de réfraction moyens employés sont peut-être un peu faibles.
- que ces houles théoriques sont issues d'une aire de génération locale, sans decay, et que la croissance de la hauteur de la houle mesurée coïncide bien avec le renforcement du vent de Ouest-Sud-Ouest qui va atteindre 13 m/s.

Enfin, les périodes de houle mesurées, $13''$ et $10''5$, ne correspondent pas du tout aux périodes calculées ; c'est exceptionnel, car l'accord sur ce point est toujours très bon dans cette méthode. Ces valeurs semblent même paradoxales en elles-mêmes, car on voit mal de longues périodes avec de petits fetchs locaux.



Ces houles ont souvent la même direction et sont donc susceptibles de battements si leurs périodes sont suffisamment voisines. Ainsi, le calcul de la période de battement de deux houles locales de Sud-Ouest, de périodes respectivement 3,6 et 5,5 secondes, fournit-il la valeur de 10''4 étrangement voisine de la période 10''5 mesurée.

Il faut bien se garder d'en conclure que là se trouve la solution, car c'est sans doute une coïncidence et le phénomène de battement n'expliquerait d'ailleurs pas une telle différence d'amplitude.

En résumé, la méthode utilisée a bien rendu compte des faits lorsqu'il s'est agi d'aires de génération de houle éloignées, même si leur répartition dans l'espace et dans le temps était fort complexe. Dans la "mer du vent" où la situation est très changeante, cette méthode est par contre inapplicable.

Elle a eu du moins le mérite de montrer comment un vent et un fetch à la côte peuvent lever une tempête s'ils s'appuient sur une mer déjà grosse.

Les phénomènes de battement restent toutefois toujours possibles.

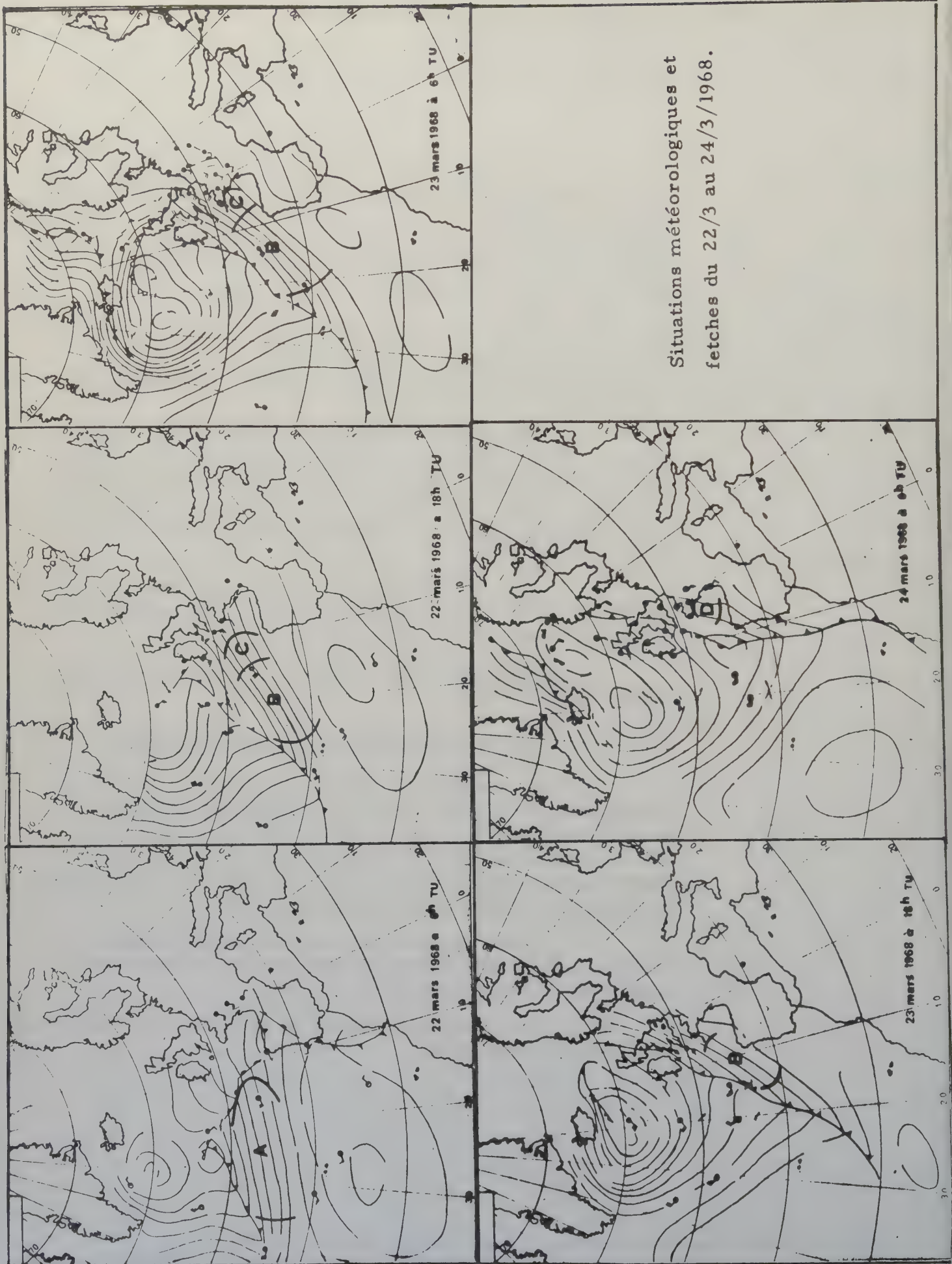
3 - 4 - 3 - Nouvelle estimation d'une houle maximale :

On retire donc comme enseignement de l'étude précédente qu'une houle formée au large est prévisible et calculable. Pour une aire de génération et un vent donnés elle sera maximale si le decay est nul, c'est-à-dire si le fetch dans son déplacement vient à la côte. Les incertitudes du paragraphe précédent sont alors écartées.

L'examen d'un an de cartes météorologiques fournit pour l'année 1968 une houle maximale ainsi déterminée par la méthode S. M. B.

La figure 3.16 montre la situation sur l'Atlantique Nord, le 23 Mars 1968.

FIG 3.16



L'étude faite par la méthode S.M.B., d'une manière semblable à celle de la tempête du 28-29-30 Avril 1968, a fourni les résultats consignés dans le tableau (annexe).

On a ensuite adopté, compte tenu des directions de houle et de leur période, les coefficients de réfraction suivants:

- Houle A, A', A'', A''' (direction Ouest - Ouest-Sud-Ouest) période moyenne 12 secondes, coefficient de réfraction = 0,2.
- Houle C (direction Ouest - Sud-Ouest), coefficient de réfraction = 0,5.
- Houle B, B', B'' (direction Ouest-Sud-Ouest - Sud-Ouest) période moyenne 14,2 secondes, coefficient de réfraction = 0,6.

Il en résulte comme précédemment une courbe théorique (figure 3.17) qui ne donne pas un état exact de la mer, mais l'état maximum possible, dans le cas où le principe de superposition des petits mouvements pourrait s'appliquer aux houles significatives. Il peut en effet exister des vagues issues de la houle A et de la houle B qui soient en phase et dont les directions soient sensiblement les mêmes (la réfraction provoquant une déviation vers l'ouest des houles de direction ouest-sud-ouest).

Il apparaît à la lecture de cette courbe théorique que la hauteur significative maximum possible sera de 5,70 m. Comme la hauteur significative maximum correspondant à la houle B est de 5,12 m., on peut donc en déduire que la hauteur significative maximum sera comprise entre 5,12 m. et 5,70 m.

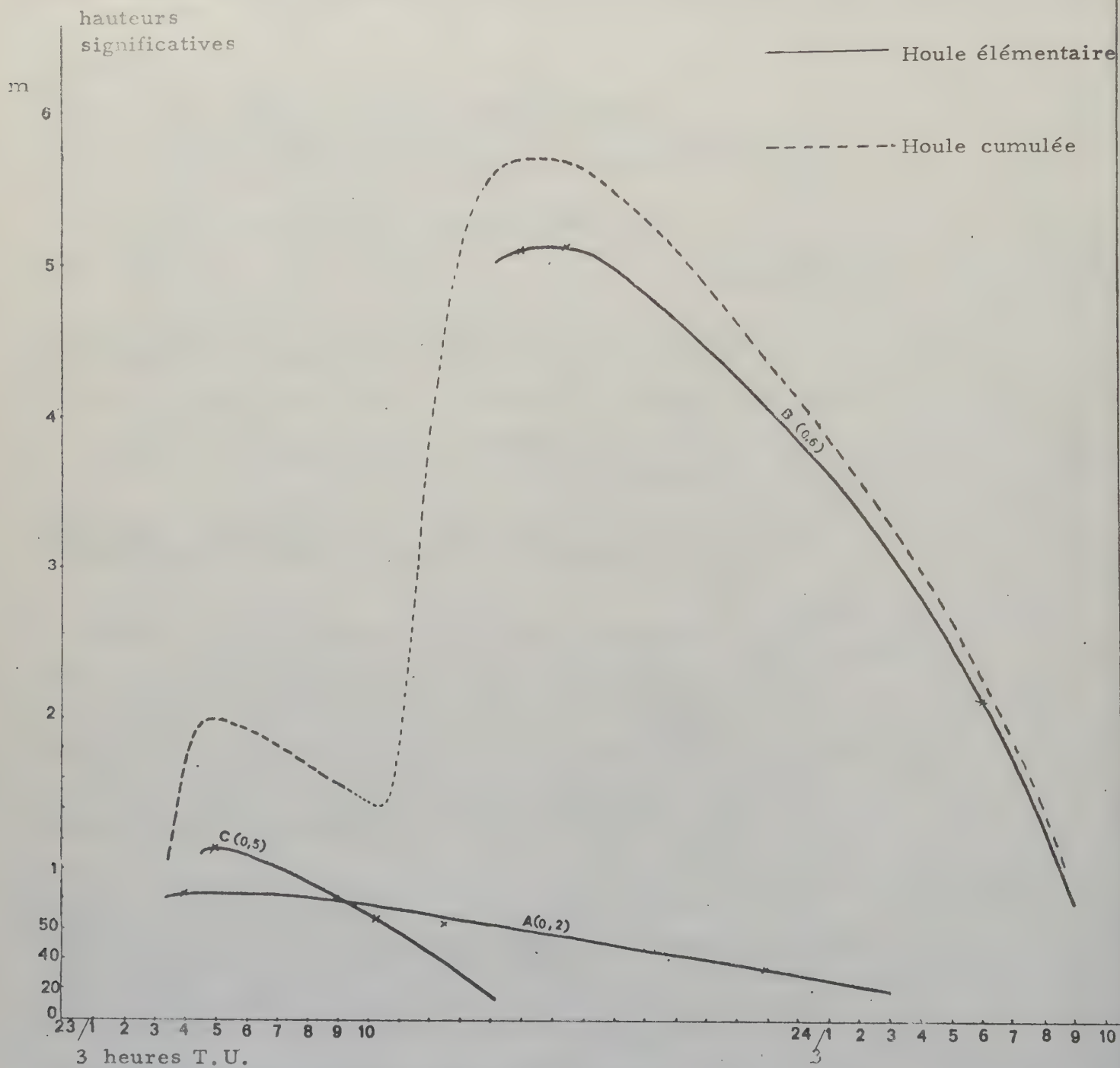
Le plus grand creux possible sera donc approximativement:

$$5,70 \times 1,87 = 10,65 \text{ m.}$$

La plus grande vague aura une hauteur comprise entre:

$$5,12 \times 1,87 = 9,57 \text{ m.}$$
$$\text{et } 5,70 \times 1,87 = 10,65 \text{ m.}$$

Etude théorique de la tempête du 23 Mars 1968



: Hauteurs significatives maximales de la houle réfractée
du 23/3 au 24/3/1968.

En utilisant la même courbe, on peut remarquer que la durée d'une telle houle de hauteur significative moyenne de 5,40 m. et dont certaines vagues atteignent 10 m. environ, est de 3 heures. Par conséquent, pour 1968, la fréquence d'une telle houle est:

$$\frac{3}{24 \times 365} = 0,03 \%$$

Pour une houle de hauteur significative 3,80 m. environ et dont certaines vagues atteignent 7 m., la fréquence sera de 0,12 % (sa durée étant de 10 heures).

Si l'on reporte cette valeur de 7 m. sur la figure 3.9, en fonction de sa probabilité, on constate qu'elle est légèrement supérieure à la hauteur correspondante à la loi de LARRAS. L'écart est faible et peut être dû à une surestimation du coefficient de réfraction. Cependant, cette occurrence de 10 heures d'une houle dont les plus fortes vagues atteignent 7 m., semble, sur une durée d'une année, en bon accord avec les premiers résultats extraits de l'analyse statistique.

3-5 - Estimation d'un clapos d'estuaire.

Ces méthodes peuvent être utilisées pour estimer le clapos maximum pouvant régner dans l'estuaire.

Un vent de Ouest-Sud-Ouest de 23 m/s peut y souffler sur une étendue maximum de 1,6 mille.

Il y lève alors un clapos de 70 centimètres de hauteur.

3-6 - CONCLUSION -

L'étude ayant été volontairement limitée au Secteur Ouest, on peut dégager les résultats suivants:

Les houles sont en général très peu régulières.

Les phénomènes de battement sont à craindre.

Certaines parties des spectres des éléments (période ou hauteur) des houles suivent, une répartition gaussienne, ce qui est toujours le signe d'une très grande complexité. (LARRAS, 1961) MICHE, 1954).

Les périodes les plus fréquentes sont 10-11 secondes.

En dehors de l'abri de l'Ile de Groix, on peut avoir tous les ans une tempête comprenant une vague de 5 mètres de hauteur, et tous les dix ans, une vague de 10 mètres; la notion d'amplitude maximale qui a servi à établir ces chiffres étant en soi une marge de sécurité.

Les houles les plus fréquentes viennent de l'Ouest-Sud-Ouest. Cette direction coïncide avec celle des vents locaux les plus fréquents et les plus forts. Les fetchs à la côte associés à ces vents violents provoqueraient donc les tempêtes les plus dangereuses.

Les orthogonales des houles d'Ouest-Sud-Ouest sont généralement perpendiculaires au littoral situé dans la région Est proche de la pointe du Talud. Les concentrations de houle y sont importantes.

Une ligne de basses relie l'archipel des Glénans à l'Ile de Groix, affaiblissant ces houles de moitié.

Les houles de Sud-Ouest, moins fréquentes et moins fortes arrivent peu amorties au rivage Pointe du Talud - embouchure de la Laita. L'Ile de Groix constitue un brise lames pour cette direction, avec formation d'une zone d'abri.

Ces houles sont les seules qui soient susceptibles de créer des "long-shore currents" de la Pointe du Talud vers l'Est; ils sont certainement de peu d'ampleur.

Entre l'Ile de Groix et la côte, l'amplitude de la houle est très variable suivant sa direction au large et le lieu de l'observation. Cependant, la Fosse du Talud est très souvent une zone de moindre agitation. La houle d'Ouest-Sud-Ouest y crée peut-être un courant de retour vers le large.

La conclusion la plus importante est d'ordre pratique: la méthode S.M.B. fournit dans cette région une excellente prévision des houles d'origine lointaine.

Si l'on pense qu'un observatoire collationnant les renseignements des sémaphores, des navires, les données météorologiques, peut aisément assumer la surveillance des conditions locales, donc couvrir le domaine où la méthode S.M.B. s'avère insuffisante, on voit qu'on peut songer raisonnablement à une prévision de houle guidant la prospection sur le plateau continental, la pose de structures sous-marines, etc...

CHAPITRE IV

LES COURANTS DE BAS-ESTUAIRE

Introduction.

Etudes antérieures.

Mesures 1964 - 1968.

Conclusion.

4-1 - Introduction

Le paragraphe 3-5 de l'étude des houles a déjà montré la grande différence entre les conditions d'agitation à l'embouchure et à l'intérieur de l'estuaire. Cette différence est encore plus accusée lorsqu'il s'agit de courants, et l'influence de la morphologie se fait d'autant plus sentir qu'on s'enfonce davantage dans les terres.

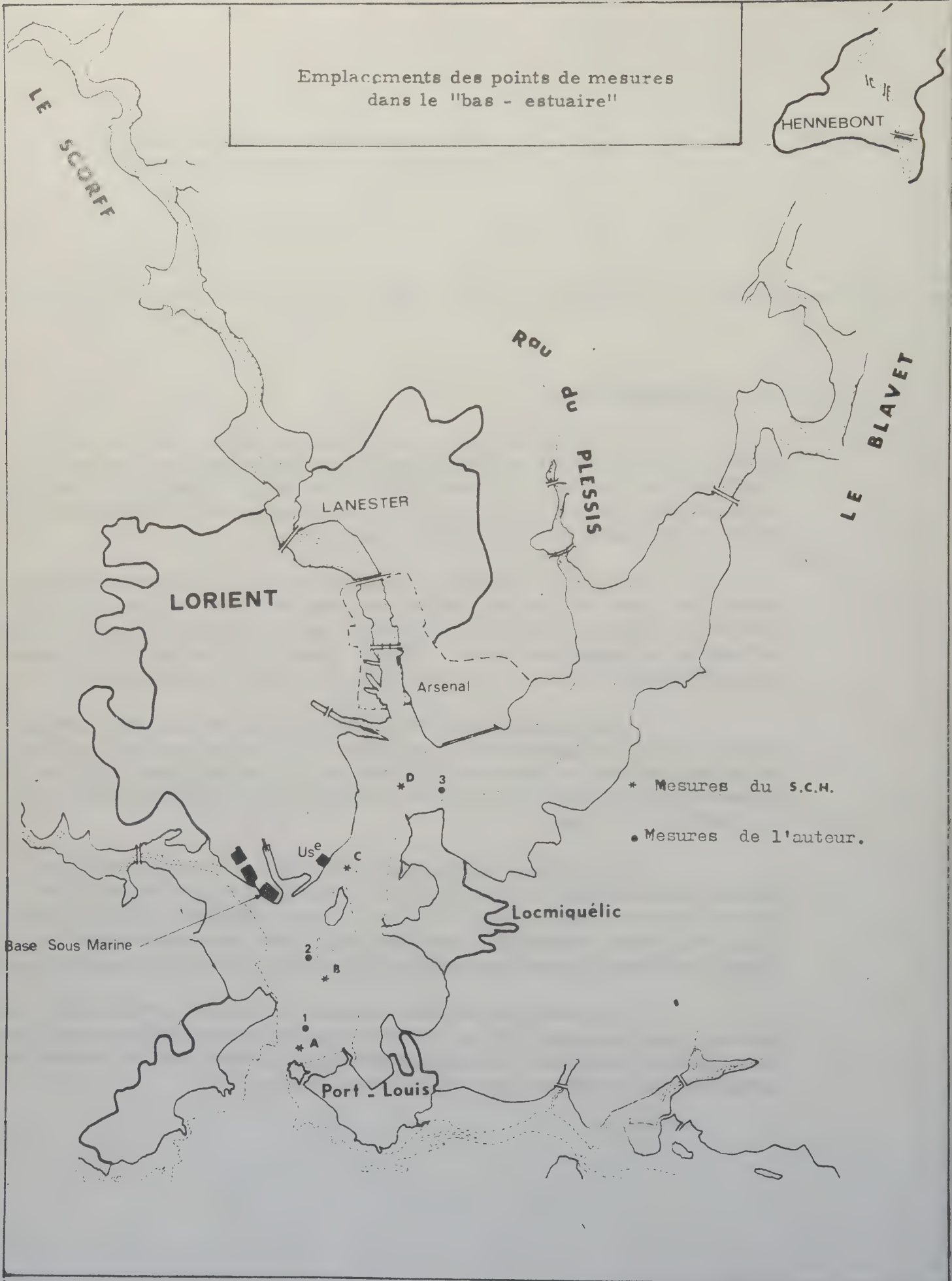
Pour un observateur venant de la mer, et remontant vers le fleuve, une étude de courants définit une zone de transition entre la mer ouverte et l'estuaire proprement dit; c'est le "bas-estuaire". Dans la région lorientaise ce bas-estuaire est, à peu de chose près, couvert par la carte marine "Passes et Rade de Lorient" SH. 6470 (1967) (voir plan 4.1).

C'est la zone des accès aux trois ports de Lorient, port de pêche, port de commerce et port militaire. Les caractères géographiques principaux en sont le confluent du Blavet et du Scorff au Nord, le goulet de Port-Louis au Sud. C'est donc la zone à la fois la mieux connue et la plus difficile à étudier.

Le mouvement incessant des navires y modifie considérablement les conditions naturelles. Dans ces passages resserrés, il est permis de penser que l'évitage d'un cargo lourd (déplaçant 25.000 tonnes d'eau) au port de commerce, provoque sur le fond des mouvements turbulents tout aussi importants que ceux provoqués par les courants de marée.

C'est donc principalement dans son aspect de "transition" que cette zone est envisagée ici; la connaissance des phénomènes en mer ouverte la description ultérieure du complexe estuarien permettront de revenir sur certains aspects de cette zone brièvement évoqués.

Emplacements des points de mesures
dans le "bas - estuaire"



4-2 - Etudes antérieures

4-2-1 - Courants dits "de navigation".

Le Service Hydrographique entreprit une série de mesures de courants dans les chenaux d'entrée en 1951 (Mission GROUSSON). La majorité de ces mesures ont été effectuées à la profondeur de six mètres, certaines à 1,50 mètres.

L'ouvrage SH 550, déjà cité, reprend ces données en les complétant par des renseignements d'origine locale.

Bon nombre de ces résultats sont intéressants pour une étude de sédimentation.

Les courants sont alternatifs bien sûr, mais leur direction de flot n'est pas toujours symétrique de celle du jusant, la veine de flot a toujours une tendance très marquée à porter vers l'est, et notamment au confluent du BLAVET et du SCORFF où le courant prédominant de flot est dirigé vers le BLAVET (voir figure 4-2).

Les vitesses sont variables suivant le lieu ; l'ouvrage SH 550 cite dans le goulet de PORT-LOUIS, des vitesses de flot de 3,5 noeuds en vive-eau, 4 noeuds en jusant ; la variation en profondeur n'est pas précisée. Partout ailleurs, on note que les vitesses maxima n'atteignent jamais deux noeuds en vive eau.

Le rapport :
$$\frac{\text{vitesse maximum de flot}}{\text{vitesse maximum de jusant}}$$
 est lui aussi, variable suivant l'endroit.

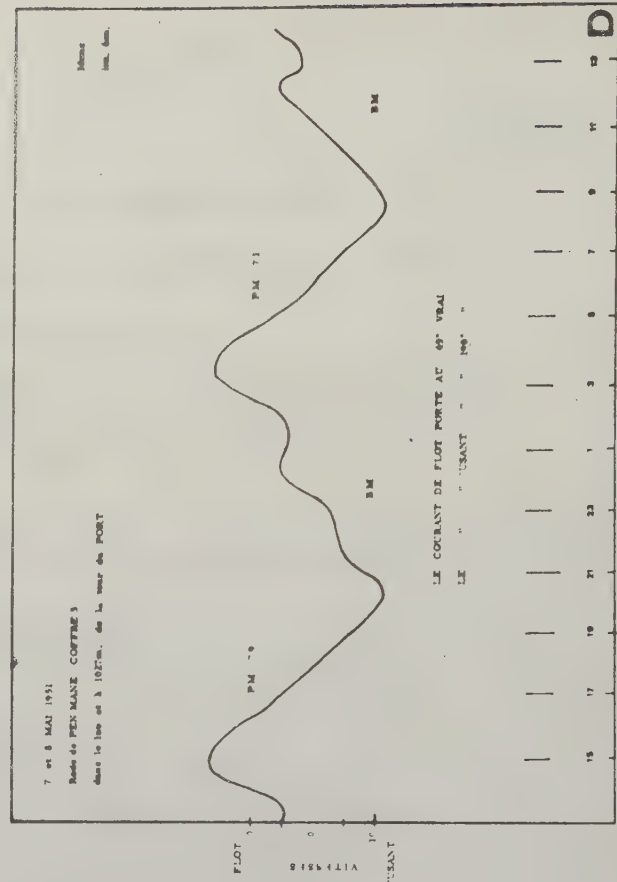
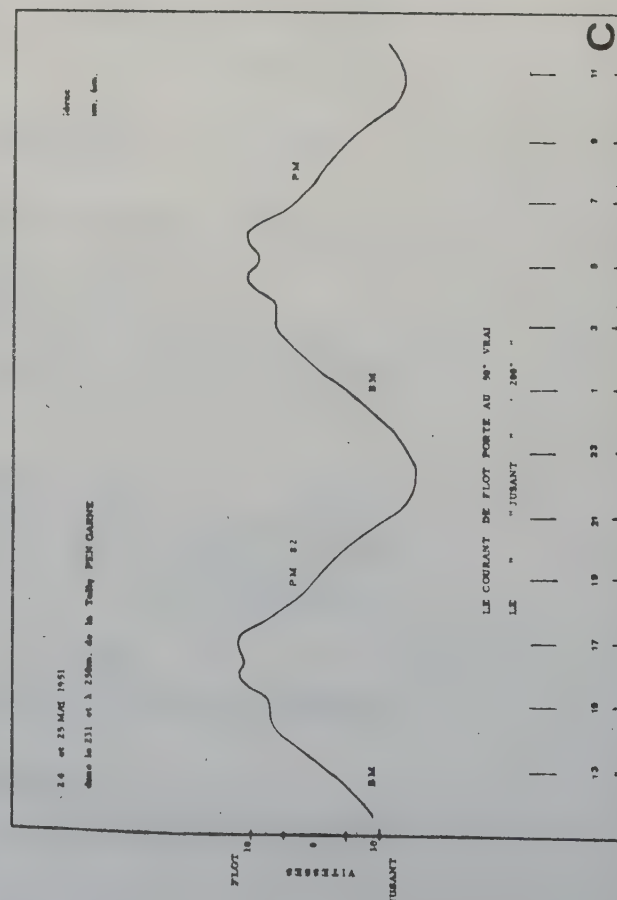
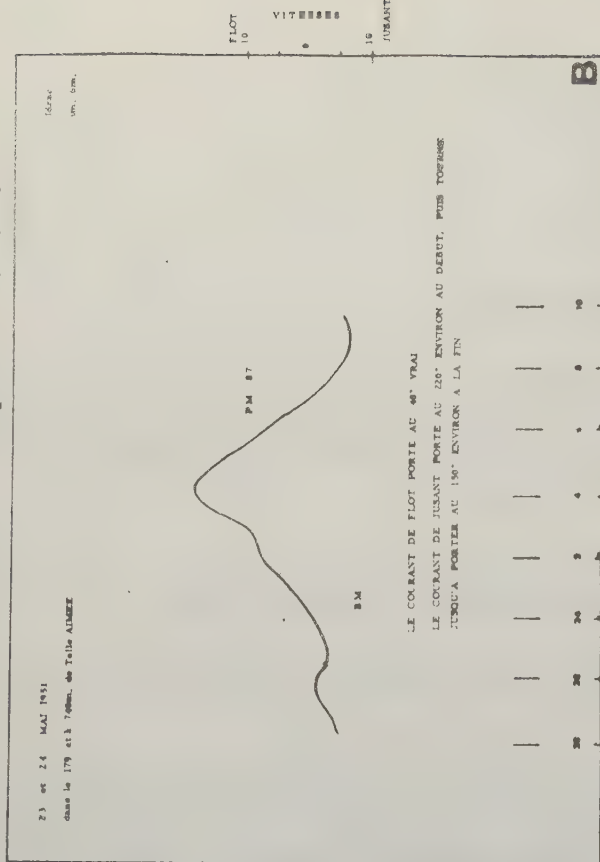
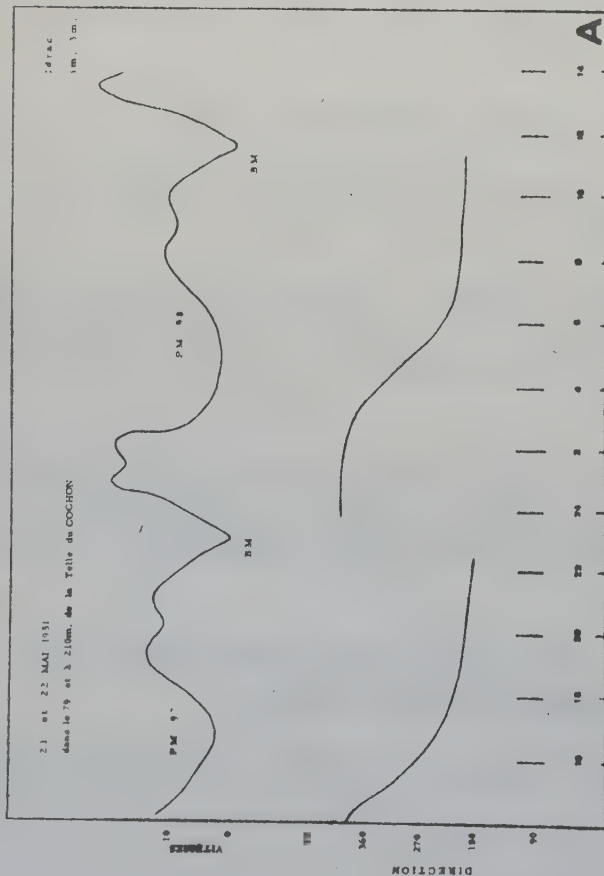
Sur les quatre stations : A, B, C, D, trois : A, B, D, sont situées en des passages où la largeur est suffisante pour que chenaux de flot et de jusant soient différents ; ces points sont de plus, près de la rive gauche.

On constate que le rapport ci-dessus est supérieur à un dans ces trois mesures. Par contre, dans la station C, en un passage étroit et dans le chenal ouest de l'île St-MICHEL, le rapport est inférieur à un.

Toutes les courbes de vitesse (voir figure 4-2) montrent bien en flot la présence d'un harmonique.

Le courant de vidange, au jusant, présente lui aussi souvent, deux maxima.

Mesures de courant exécutées dans le bas-estuaire par le Service Hydrographique aux points A, B, C, D.



Enfin, deux observations sont intéressantes pour la compréhension du mouvement des sédiments :

a) Entre le GRASU et les TRUIES, c'est-à-dire, à la sortie du chenal de la Passe Ouest, l'étale de pleine mer dure deux heures (de 0 à 2 h. après P.M.). C'est là peut-être, l'indice du début de la déformation de l'onde marée.

b) Au goulet de PORT-LOUIS :

"pendant la fin du flot et en jusant, le courant porte sur les bancs du POT et de la JUMENT ; ce phénomène est dû à la fin du flot, à une veine de courant nord-ouest longeant la presque île de PORT LOUIS, et en jusant, à la veine de courant ouest, venant de la direction du Port de PORT LOUIS".

En d'autres termes, en fin de flot et pendant tout le jusant, le courant est plaqué contre la rive droite à sa sortie du goulet de PORT LOUIS.

4-2-2 - Etude des mouvements d'eaux polluées

Les PONTS & CHAUSSEES du MORBIHAN exécutèrent de nombreuses études sur la salubrité de la Rade, dans laquelle se jetaient les différents égouts de la Ville de LORIENT.

Ainsi du 22 Juin 1933 au 25 Février 1934, 23 mesures de courant furent exécutées.

Elles consistaient à immerger des bouteilles lestées, reliées en surface à un flotteur dont on suivait le déplacement, elles furent lancées en jusant, à la sortie de l'égout principal et à des coefficients de marée différents.

Il ressort de ces mesures une conclusion fort intéressante : "quelle que soit l'importance de la marée, les eaux usées atteignent au moins la sortie de la rade ; par forte marée, elles en sortent assez rapidement, mais par morte-eau, une partie de ces eaux peut être ramenée en amont par la marée montante".

L'heure du rejet par rapport à la venue du flot était évidemment capitale : en Juillet 1962, les PONTS & CHAUSSEES de LORIENT reprenaient quatre expériences du même genre, mais avec un flotteur plus perfectionné (un croisillon). Les flotteurs lâchés tardivement (fin de jusant et même mi-jusant en morte eau)

se dirigeaient en fin de parcours vers l'amont et rentraient exclusivement dans le BLAVET.

Ainsi :

- la direction prédominante du courant de flot vers le BLAVET est confirmée,

- le va et vient des masses d'eaux saumâtres, pendant plusieurs cycles de marée, avant d'être expulsées de la Rade, est parfaitement mis en évidence.

4-3 - Mesures 64 - 68

Les études sur cette zone étant très avancées, je me suis contenté de quelques vérifications et compléments.

4-3-1 : les mélanges de masses d'eaux

Bien qu'il ne s'agisse pas ici d'océanographie physique, les problèmes de diffusion, pour la salinité notamment, doivent être envisagés pour éclairer les phénomènes de mélange d'eaux douces et d'eaux salées, qui interviennent considérablement dans la sédimentation.

4-3-1-1 : Description des variations de salinité

Dans le bas estuaire, les salinités sont toujours très élevées (plus de 20 o/oo).

En un même point, à un instant considéré, on constate en gros, une certaine homogénéité sur le plan vertical.

A la sortie du goulet, au point 1 (voir figure 4-1), ce phénomène est bien perceptible comme le montrent les résultats des stations 1 et 2 (annexe chapitre 4) En 1, on note à la basse mer une légère stratification, mais par contre, pour la station 2, les courbes de variation dans le temps de la salinité à - 6 m et - 1m sont pratiquement confondues. (1)

Cette homogénéité est plus ou moins nette suivant la position amont-aval du point considéré, le coefficient de la marée et le débit d'eau douce des deux fleuves, le BLAVET et le SCORFF.

station 1 - 13 Août 1964	- coeff. 71-65	- Débit BLAVET : 8,3 m ³ /s.
station 2 - 30 Juill 1968	- " 78 - " "	: 4,6 m ³ /s.

Ainsi, dans la station 4 (annexe chapitre 4) à l'embouchure du BLAVET, (point 3) le gradient vertical de salinité est-il très sensible (de 10 o/oo en surface à 30 o/oo au fond à la basse mer), le coefficient de marée est 47 et le débit du BLAVET : $27,8 \text{ m}^3/\text{s}$, ce sont donc déjà des conditions limites et on note toujours en descendant de ce point 3 vers l'aval, une nette tendance à l'homogénéisation.

Ainsi, par coefficient de 51, quatre heures après la pleine mer, et avec des débits à POLVERN très faibles ($4,2 \text{ m}^3/\text{s}$), une mesure continue de salinité en surface fut réalisée. Exécutée à trois noeuds (soit 40' de trajet) de l'embouchure du BLAVET au goulet de PORT-LOUIS, elle a fourni les résultats suivants :

- entre les deux points extrêmes, la salinité varie de 22 à 32 o/oo,
- mais la variation n'est pas régulière, l'entrée en rade se marquant par la plus forte augmentation de salinité : (25,5 o/oo au point D).
- la progression est par la suite assez constante.

Beaucoup moins régulière est la variation transversale.

Ce même jour, à la même heure, on perçoit immédiatement avant la sortie du goulet l'existence d'un "fleuve" de salinité : 31,0 o/oo au centre repoussant sur la rive gauche des masses d'eau à : 32,2 o/oo.

Le brassage énorme dû au passage du goulet va réduire l'individualité de cette masse d'eau ; cependant, en aval, on découvre, en surface, des eaux de salinité 32 o/oo coulant sur des eaux progressivement plus salées, atteignant un maximum de : 33,4 o/oo à - 6 mètres.

En hiver, le 20 Décembre 1967, le débit à POLVERN est plus important : $35 \text{ m}^3/\text{s}$ ce jour-là. Ce mi-jusant d'une marée de 72, un fleuve à 29 o/oo, sort de la rade entre deux masses d'eaux à 30 o/oo.

En plein été, par vents d'Est, avec un débit moindre et un coefficient plus fort : ($C = 78$ $Q = 4,6 \text{ m}^3/\text{s}$) aucune différence de salinité (du moins de 0,1 o/oo) ne sera plus perceptible.

4-3-1-2 Variations d'autres facteurs

Dans une étude de pollution entreprise pour le compte des PONTS & CHAUSSEES (GROVEL, Mme QUERE, 1969) des mesures in situ de teneurs en oxygène dissous à - 1 mètre, avaient permis de noter en rade des valeurs toutes très proches de la saturation. La rade est donc un milieu très aéré.

La courbe de variation en un point de cette teneur en oxygène dissous (voir station 2, annexe chapitre 4), accuse un maximum très net, deux heures après la basse mer, correspondant au courant de flot maximum.

Enfin, dans cette même mesure, la pollution bactérienne, dont l'origine est pourtant spécifiquement superficielle, est à peine plus faible à - 6 mètres qu'à - 1 mètre ; ces bactéries sont d'excellents marqueurs et prouvent qu'en jusan le brassage des eaux dans la rade, est considérable.

4-3-2 - La circulation

Les mesures du S.H. avaient déjà bien établi que les courants en rade étaient du type alternatifs. Mais l'étaient-ils sur toute leur hauteur ?

4-3-2-1 Résultats des stations aux points fixes 1, 2, 3, 4.

Exécutées en une période d'environ douze heures (mise à part l'étude de flot 3), ces stations servirent principalement de vérification.

Ainsi on retrouve constamment une poussée du courant de flot plus forte au fond qu'en surface, ce qui est un phénomène maintes fois observé dans d'autres estuaires. Toutefois, elles ont permis de différencier deux états, dont l'un est en fait la limite de l'autre.

- a) En marée moyenne et faibles débits ($5 \text{ m}^3/\text{s}$)
Le courant est alternatif partout et à toute hauteur.
- b) En marée moyenne de morte-eau et débits importants ($30 \text{ m}^3/\text{s}$).

On découvre à la limite Nord de la rade, c'est-à-dire à l'embouchure du BLAVET, des phénomènes particuliers (station 4, annexe chapitre 4). L'étale de pleine mer est très longue. Une heure après l'étale, le courant de jusant dévale en une mince pellicule de surface sur des masses d'eaux qui semblent immobiles (du moins au moulinet).

Deux heures après la pleine mer, le courant de jusant est bien établi sur presque toute la hauteur mais il reste encore une masse d'eau "immobile" au fond.

Le chapitre 5 analysera cette description. Dès maintenant, on peut cependant considérer que là se situe la limite inférieure de l'estuaire.

En descendant vers l'aval, la tendance à l'homogénéité des salinités s'accompagne donc d'une même tendance dans la répartition verticale des vitesses.

4-3-2-2 Enregistrement de courants près du fond (point 3)

Ces enregistrements sont toujours délicats et leur représentativité toujours sujette à caution : la mauvaise tenue des fonds d'estuaire, le passage des navires et surtout les objets flottant entre deux eaux sont de réelles difficultés.

Sur trois essais, un seul parut satisfaisant et encore sur six jours d'enregistrement, en fallut-il éliminer trois comme douteux, le courantographe fut mouillé à 1,50 mètre du fond, au point 3 où chenaux de flot et de jusant paraissaient plus ou moins confondus. Ces trois jours de mesure ont été représentés en annexe par les droites de vitesse de la page

A première vue, on observe :

- a) que le flot est plus bref que le jusant,
- b) qu'il débute au fond avant l'étale de basse mer (harmonique plus rapide que l'onde principale ?)
- c) que si le courant de flot passe par deux maxima, il en est de même du courant de jusant.,

La comparaison entre les courants maxima ainsi qu'entre les courants moyens, de flot et de jusant, peut se présenter sous la forme de tableaux suivants :

Coefficients	59	65	70	76	81
Vitesse maximale de flot	32	32	40	39	44 cm/s
Vitesse maximale de jusant	37	41	30	47	33
Vitesse moyenne de flot	15	20	24	25	28
Vitesse moyenne de jusant	22	21	18	26	18

Sur ces cinq cas, les deux cas où la vitesse du jusant est très supérieure à la vitesse du flot, correspondent à des diminutions brutales du débit à POLVERN (Voir Fig 4 - 3)

Cette figure 4 - 3 représente les deux vitesses maxima de flot en fonction du coefficient de marée. On obtient deux lignes brisées, à priori bien difficiles à interpréter.

Mais, la mesure a lieu pendant la période de l'année où pour un même coefficient, la marée du soir atteint une cote plus élevée que la marée du matin. On s'aperçoit alors que l'alternance marée du soir - marée du matin se retrouve bien sur ce graphique.

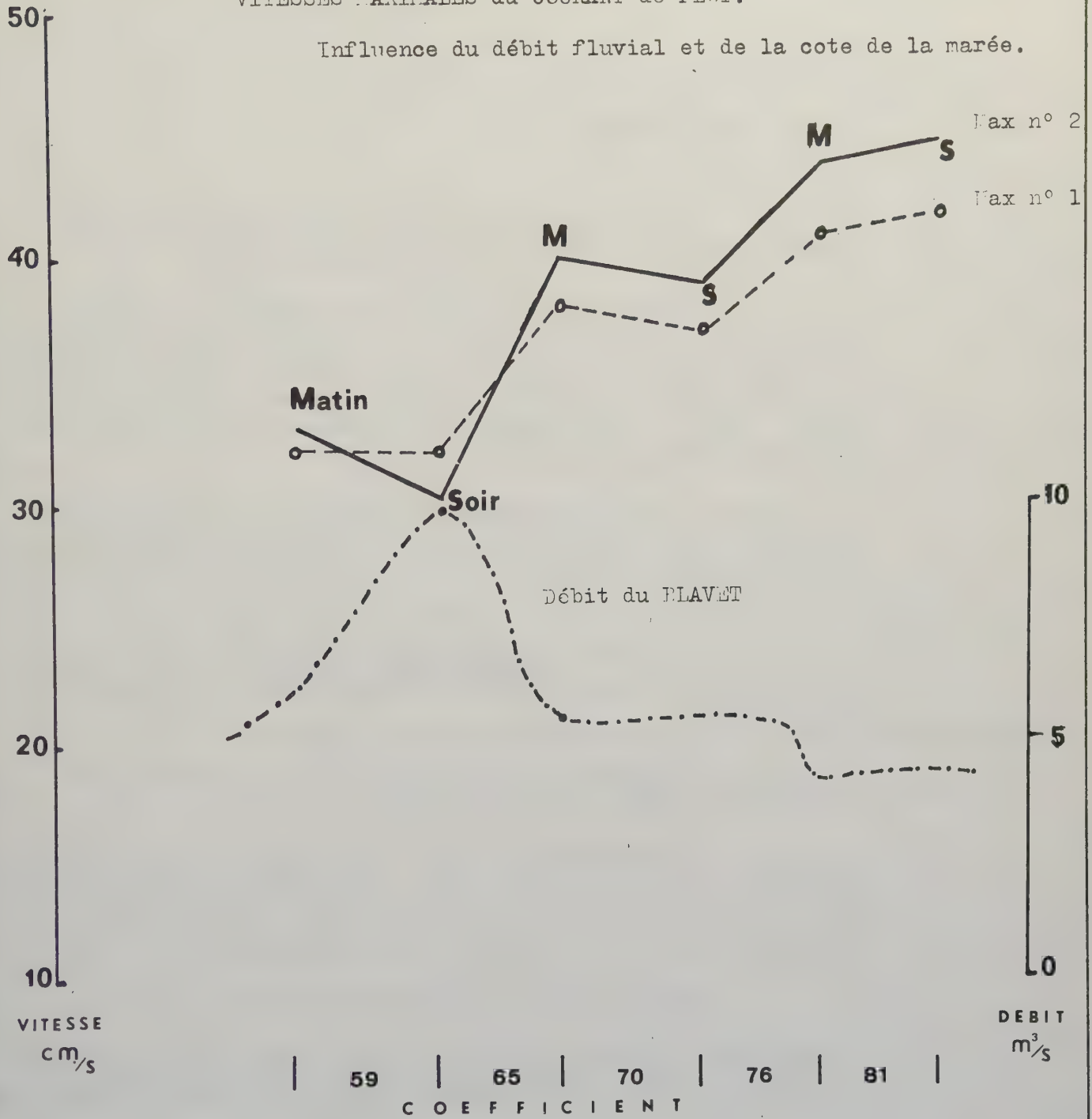
Ainsi, pour un même coefficient, le courant de flot sera d'autant plus fort que la hauteur d'eau atteinte par la pleine mer sera plus faible.

De plus, cette ligne brisée encadre assez bien une loi de proportionnalité entre la vitesse du courant et le coefficient de la marée ; la valeur très faible du courant de flot de coefficient 65 semble alors s'expliquer par la progression du débit du BLAVET à POLVERN.

FIG 4.3

VITESSES MAXIMALES du COURANT de FLOT.

Influence du débit fluvial et de la cote de la marée.



4 - 4 CONCLUSION

L'influence de la hauteur d'eau sur la valeur de la vitesse maximum de flot est riche d'enseignements.

En effet, tout ce qui pourra modifier la marée en mer ouverte, dépression barométrique, gonflement à la côte par un vent d'afflux, influera sur la circulation du bas-estuaire. Ainsi, les vents d'Ouest Sud-Ouest les plus fréquents et les plus forts (voir par. 2-2) provoquent une surélévation de la marée ; ils vont donc ralentir les courants de flot.

Dans le schéma A₁ de la figure 2-10, le mouvement tourbillonnaire déjà cité, montre bien que les courants de dérive venant de l'extérieur, ne les accélèrent pas considérablement et seulement en surface.

Le jusant sera par contre, peut-être un peu freiné en surface. Les courants de jusant au fond risquent donc d'être les plus violents.

Par temps calme ou vents d'Est, le phénomène est inverse, flot et jusant sont accélérés.

L'évacuation des eaux saumâtres du jusant est notamment entraînée par les courants de pente, et ce fleuve à salinité moindre dans une zone où la diffusion de turbulence est moindre que dans la rade pourra conserver longtemps son individualité (voir par. 2-5).

La rade est donc bien un milieu de transition :

- d'une part, elle homogénéise des masses d'eaux de densité différente en un fleuve d'eau saumâtre qui va couler vers la haute mer ,
- d'autre part, malgré le filtre que constitue le goulet de PORT LOUIS elle suit encore les variations de la circulation littorale extérieure, liée elle-même aux variations météorologiques.

Si l'on ajoute à cela l'action déjà sensible des débits du ou des fleuves, on voit que les calculs de prévision du courant, en un point, atteignent ici leur complexité maximum. Même en flot, il ne saurait être question d'établir une quelconque prédiction sans une situation marégraphique parfaitement connue.

CHAPITRE V ,

L'ESTUAIRE DU BLAVET

Position du problème.

Mesures hydrologiques.

Description de la circulation et de la diffusion dans l'estuaire.

Etude théorique de la lentille dans l'hypothèse d'un phénomène de convection par gravité.

Conclusion.

5 - 1 - Position du problème

Pour l'étude d'un phénomène estuarien, une description précise de la géographie des lieux est indispensable.

5 - 1 - 1 - Cadre géographique

Sur la carte 5 - 1, la partie du Blavet étudiée dans ce chapitre est comprise entre les points 3 et 16, c'est-à-dire entre la Pointe de Pen-Mané (débouché du Blavet dans la rade), et l'écluse-barrage de Polvern.

Sur cette longueur on peut distinguer deux parties distinctes :

- de Pen Mané au Pont du Bonhomme (point 7) :

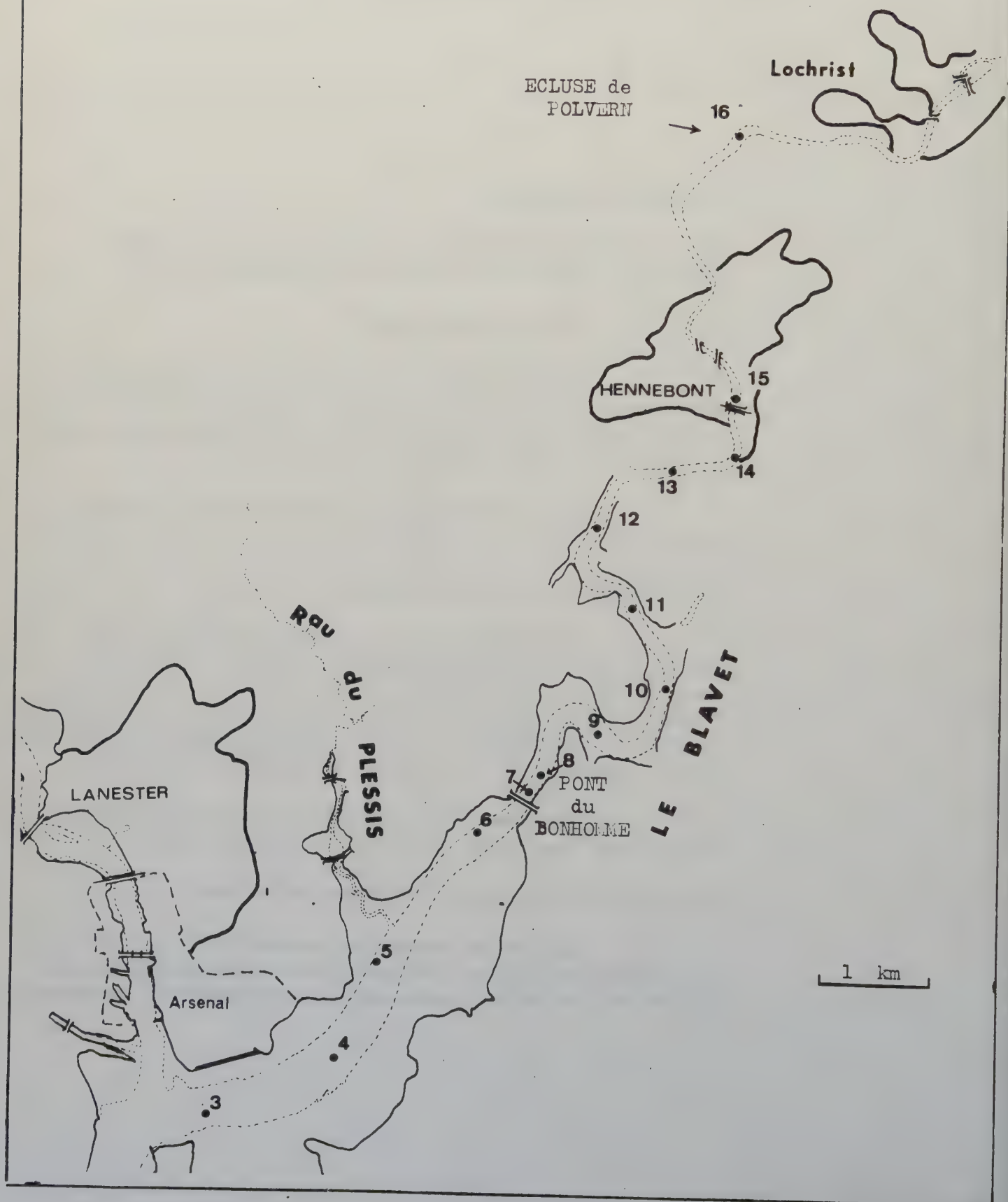
Le Blavet occupe une vallée très large et le chenal y décrit un S très allongé ; le chenal s'élargit progressivement du Nord au Sud : 110 mètres au Pont du Bonhomme, 340 mètres à Pen Mané. Ces largeurs sont mesurées au zéro hydrographique car cinq grandes vasières recouvertes à haute mer portent par endroits la largeur à 800 mètres.

Le rivage ne comporte pas de relief accusé ; le vent fera donc sentir son effet sur ce plan d'eau.

- du Pont du Bonhomme à l'écluse de Polvern :

Le Blavet occupe une vallée étroite : de 80 à 100 mètres de largeur. Son cours est souvent très encaissé (35 mètres au Pont du Bonhomme) en de nombreux méandres.

ESTUAIRE DU BLAVET S. STR.
POINTS DE MESURES HYDROLOGIQUES



En amont, l'écluse de Polvern arrête toute progression de la marée.

Son radier est situé au dessus du zéro hydrographique. La variation de la cote du fond d'Hennebont à Pen Mané peut être représentée par la figure 5 - 2. (Renseignements tirés d'une carte de pilote ; il n'y a en effet aucun document bathymétrique officiel sur le Blavet).

5 - 1 - 2 - Contexte Hydrologique

A Lorient, l'unité de hauteur de la marée est :
 $U = 2,26$ mètres.

On aura donc une amplitude maximale de :
 $5,66$ mètres pour un coefficient de 120.

La marée est évidemment de type semi-diurne. Les apports d'eau douce essentiels en rade proviennent de deux rivières : le Scorff et le Blavet.

Seule la structure estuarienne du Blavet sera considérée ici.

Le Scorff a fait l'objet de nombreux travaux d'aménagement du fait de la présence de l'Arsenal Maritime de Lorient ; il a donc beaucoup perdu de son caractère sauvage. Le Chapitre 6, décrivant le régime du Blavet, montrera que des applications de résultats du Blavet au Scorff peuvent être raisonnablement envisagées.

Pour le moment, il est seulement important de noter les apports finaux du Blavet au déversoir de Polvern. Ce déversoir effectue en effet un "lissage" de la courbe de débits. Les différences entre étiage et crue restent cependant très notables :

$5 \text{ m}^3/\text{s}$ aux basses eaux,
 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ en crue centenaire.

Une crue décennale, le 25/2/1966, a fait progresser le débit à Polvern jusqu'à $239 \text{ m}^3/\text{s}$. (Débit mesuré). Il faut cependant noter que 200 jours par an, les débits évacués vers la mer restent inférieurs à $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Profil en long de l'estuaire

Hennebont

Pont du Bonhomme

Pen-Mané

Zéro hydrographique

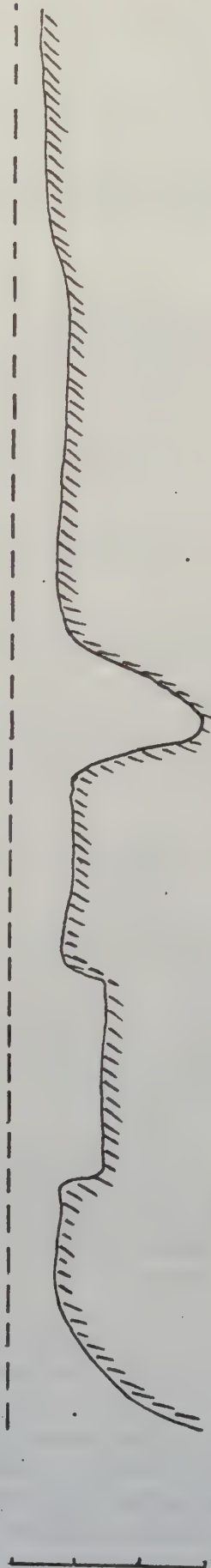
1m

2m

3m

1 km

Echelle horizontale



5 - 2 - MESURES HYDROLOGIQUES

5 - 2 - 1 - Description des mesures effectuées

De 1964 à 1967, 16 stations hydrologiques furent exécutées dans la zone estuarienne proprement dite. Deux mesures seulement furent exécutées simultanément (N°18 et N°19).

Ces stations au point fixe couvraient l'intervalle de temps d'un cycle de marée. Toutes les heures et tous les mètres, étaient notés :

- les courant, vitesse et sens,
- la température,
- la salinité (in situ).

De plus, toutes les heures, trois prises d'eau à la bouteille horizontale, permettaient d'envisager des mesures de contrôle au Laboratoire, ainsi que des dosages complémentaires comme la charge solide.

Ces stations sont décrites en annexe (p.43 à p.75)

Le dépouillement de ces stations posa un certain nombre de questions qu'il fallut résoudre par des expérimentations plus limitées mais plus précises (cf. par. 5-3-3).

Tous ces travaux étaient orientés dans l'optique d'une meilleure connaissance d'un phénomène conditionnant la sédimentation. C'est donc l'étude la circulation qui fut la plus poussée.

5 - 2 - 2 - Ordre de grandeur des résultats

5 - 2 - 2 - 1 - Courants

On distinguera tout d'abord courants de fond et courants de surface.

Courants de fond : le tableau ci-dessous présente

les différents courants maximaux mesurés à un mètre du fond, lors des stations.

Ce sont les courants de flot qui atteignent généralement les valeurs les plus élevées. Quatre exceptions sont à noter : stations 7, 8, 16 et 17.

Aucune valeur de courant de fond supérieure à un noeud n'a été relevée.

COURANTS A UN METRE DU FOND

N° Station	Point	Coefficient	Vitesse maxi de flot en cm/s	Vitesse maxi de jusant en cm/s
5	8	59-57	< 15	< 15
6	3	47		36
7	8	47	28	43
8	5	52	33	35
9	4	54	44	17
10	6	50		17
11	8	96-99	47	37
12	8	72-75		32
13	8	77-79	60	47
14	11	69-66	47	< 15
15	11	115	50	30
16	12	114	45	48
17	13	111	44	50

Courants de surface :

C'est par contre en jusant que les courants de surface sont les plus violents.

Il y a cependant des exceptions : stations 5, 13 et 14. Si pour la mesure 5, la force du vent local (14 à 18 noeuds) peut fournir une explication, il n'en va pas de même pour les deux autres stations.

Les courants les plus violents mesurés furent les suivants :

77 cm/s à la station 5 (marée moyenne, fort débit)
84 cm/s à la station 11 (vive-eau)
80 cm/s à la station 16 (vive-eau).

Il semble que ces courants atteignent rarement des vitesses de deux noeuds.

5 - 2 - 2 - 2 - Salinité

La station n°4 a fourni les plus fortes valeurs de salinité trouvées :

30 o/oo en surface,
32 o/oo au fond.

et ceci à l'entrée en rade, par pleine mer de marée moyenne. Le débit du Blavet était de 11,5 m³/s. Les salinités les plus faibles sont évidemment situées en amont. Cependant, au Pont du Bonhomme, elles peuvent déjà prendre des valeurs très basses :

Station n°6 : 10 o/oo en surface,
26 o/oo au fond.

Basse mer de marée moyenne de morte-eau : débit assez élevé : 25 m³/s.

Les gradients verticaux de salinité les plus importants furent mesurés aux stations 4 et 7. On y trouve

en effet une variation de 20 o/oo sur six mètres de hauteur d'eau.

L'échelle verticale des phénomènes peut donc être très petite.

5 - 2 - 2 - 3 - Température

La température la plus basse qui fut repérée fut de 9°, la plus élevée de 23 °.

En milieu estuarien, la relation entre la température d'une eau et sa salinité n'est pas vérifiée. La température d'une eau est, tout compte fait, fonction de son histoire, c'est-à-dire de sa durée d'ensoleillement en surface, qu'elle soit douce ou salée.

Ainsi l'influence des vasières recouverte d'une faible épaisseur d'eau est-elle très importante sur le facteur température. En été, des masses d'eau océaniques, relativement froides, submergent à marée montante des vasières déjà surchauffées et vont de plus être soumises au rayonnement solaire en mince pellicule. Elles vont donc se réchauffer rapidement.

Ainsi, la mesure n°4, en plein mois d'Août, montre les eaux les plus chaudes parmi les plus salées.

5 - 3 - DESCRIPTION DE LA CIRCULATION & DE LA DIFFUSION DANS L'ESTUAIRE.

Un simple examen des mesures exécutées permet déjà de décrire certaines structures hydrodynamiques déjà connues par les études de divers auteurs dans d'autres estuaires.

5 - 3 - 1 - Schémas classiques d'estuaires rencontrés.

5 - 3 - 1 - 1 - Estuaire homogène sur le plan vertical : ("vertically homogeneous").

(Stommel 1953, Pritchard 1955, Ketchum 1957)

L'homogénéité dont il s'agit est évidemment celle de la salinité. Les courants sont alternatifs et les mouvements affectent l'allure de déplacements de tranches d'eaux de salinité constante de la surface au fond. Seul existe un gradient horizontal de salinité.

Ces structures ont été mises en évidence dans le Blavet, tout d'abord dans les stations :

4, 6, 12

où l'on peut observer cependant un faible gradient vertical de salinité. Mais, dans les stations 11 et 13, l'homogénéité verticale de salinité est parfaitement établie. Ces structures n'ont jamais été découvertes au Nord du point 7 (Pont du Bonhomme).

5 - 3 - 1 - 2 - Estuaire à deux couches

("two-layered system")

(Alexander, Southgate and Bassindale 1931
Pritchard 1955, Stommel 1953, Otsubo et Fukushima 1959,
Bowden 1960).

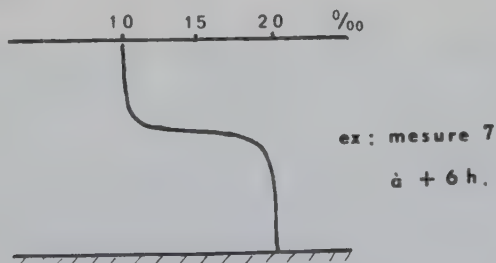
Sous une couche superficielle dont les mouvements suivent la marée, se situe une couche profonde, siège de courants constamment dirigés vers l'amont. En jusan, les courants de surface seront donc dirigés vers l'aval tandis que les courants de fond seront dirigés vers l'amont. Les salinités sont alors très tranchées :

eaux saumâtres dans la couche "aval",

eaux salées dans la couche "amont".

Au point de vue diffusion de salinité, il y a formation d'une halocline marquant à peu près la limite des deux couches :

Fig. 5-3



Cette formation se rencontre dans les stations 7, 9 et 10. Parfois, bien que la structure hydrodynamique soit bien marquée, les courants de la couche amont sont très faibles (moins de 10 cm/s), stations 15, 16, 17.

Ces phénomènes n'ont cependant jamais été identifiés comme étant stationnaires, comme c'est le cas pour ceux décrits par les auteurs ci-dessus.

5 - 3 - 1 - 3 Lentille "immobile".

(Berthois 58, 64, 65)

Cette lentille est bien définie par l'auteur comme paraissant "immobile" au moulinet ; c'est-à-dire qu'elle peut fort bien être animée de mouvements inférieurs à 15 cm/s.

Découverte pour la première fois dans l'estuaire de la Loire, elle est constituée d'une masse d'eau salée profonde qui se forme au jusant dans le chenal. Elle épouse la forme d'une lentille renflée au centre, allongée dans l'axe du chenal. Les eaux superficielles s'écoulent à sa partie superficielle en la chassant peu à peu vers l'aval. Elle disparaît en fin de jusant.

Sa position et son importance sont variables suivant les débits et les coefficients de marée.

C'est le premier phénomène non stationnaire décrit dans un estuaire.

Dans le Blavet, de telles lentilles avec des courants très faibles et très irréguliers semblent avoir été mises en évidence dans les stations :

5, 14, 18 et 19.

5 - 3 - 2 - Observations de phénomènes de détail

5 - 3 - 2 - 1 - Halocline

La présence d'une halocline n'est pas toujours

l'indice d'une structure hydrodynamique à deux couches. Ainsi dans la station n°9, constate-t'on la formation d'un "two-layered system" typique avec un faible gradient vertical de salinité.

Les haloclines les plus nettes se situent le plus souvent en fin de jusant, après disparition de cette structure à deux couches (ex. station n°7).

5 - 3 - 2 - 2 - Pente de l'halocline

L'allure de la courbe joignant les paliers successifs est souvent intéressante à noter.

Ainsi, par la mesure n°7, en flot, et pour la mesure n°9, en flot et en début de jusant, son parallélisme avec la courbe de marée est frappant. C'est l'indice d'un phénomène quasi-stationnaire.

En fin de jusant, pour la mesure n°7, la pente de l'halocline, d'abord négative puis positive, peut être interprétée comme le passage d'une poche d'eau plus douce en surface. (voir fig. 5 - 4)

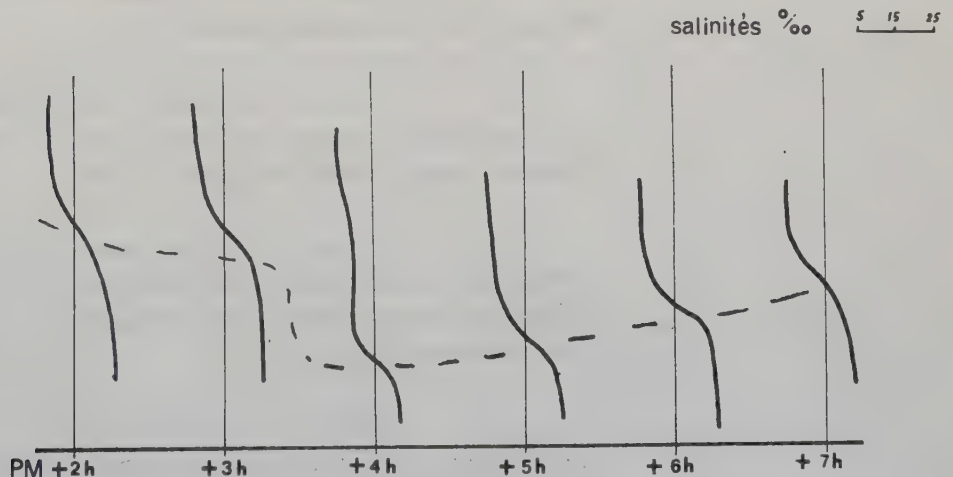


Fig. 5-4

Cette poche d'eau douce pourrait alors être une séparation entre deux lentilles "immobiles" successives.

5 - 3 - 2 - 3 Variations brusques de température

Toujours à la station 7, la variation de température est intéressante à étudier. Trois heures après la pleine mer, alors que les salinités sont sensiblement stationnaires, la température des eaux du fond tend à augmenter sensiblement. Elles semblent s'enrichir en eaux plus chaudes, donc provenant des couches supérieures.

C'est le premier indice de brassage vertical rencontré.

5 - 3 - 2 - 4 L'influence du vent

L'exemple le plus frappant de l'influence du vent sur la circulation de l'estuaire est donné par la comparaison des mesures 12 et 13 (12 et 13 Août).

Toutes deux ont été effectuées au même endroit avec des débits identiques et des coefficients très comparables. Seules diffèrent les conditions météorologiques régionales.

Le 12, les vents sont Est et faibles ; ce sont des vents de terre ou "d'amont". Le 13, les vents sont Sud-Ouest, ce sont des vents "d'aval".

Le 12, le flux total d'eau mesuré à la station est largement excédentaire vers le jasant ; le 13, il est largement excédentaire vers le flot.

L'action de ce vent régional est peut-être directe (création d'un courant de dérive dans l'estuaire), ou indirecte (création d'un courant de dérive au large, courant qui pénètre dans l'estuaire).

Toutes ces analyses de mesures posent donc des problèmes que seules des expériences complémentaires pouvaient résoudre.

5 - 3 - 3 - Expérimentations complémentaires

Elles seront décrites sous forme de questions et de réponses.

5 - 3 - 3 - 1 - Question : Y-a-t-il en surface une variation de la vitesse avec la position du point de mesure par rapport au chenal ?

Toutes les stations ont en effet été effectuées au centre du chenal.

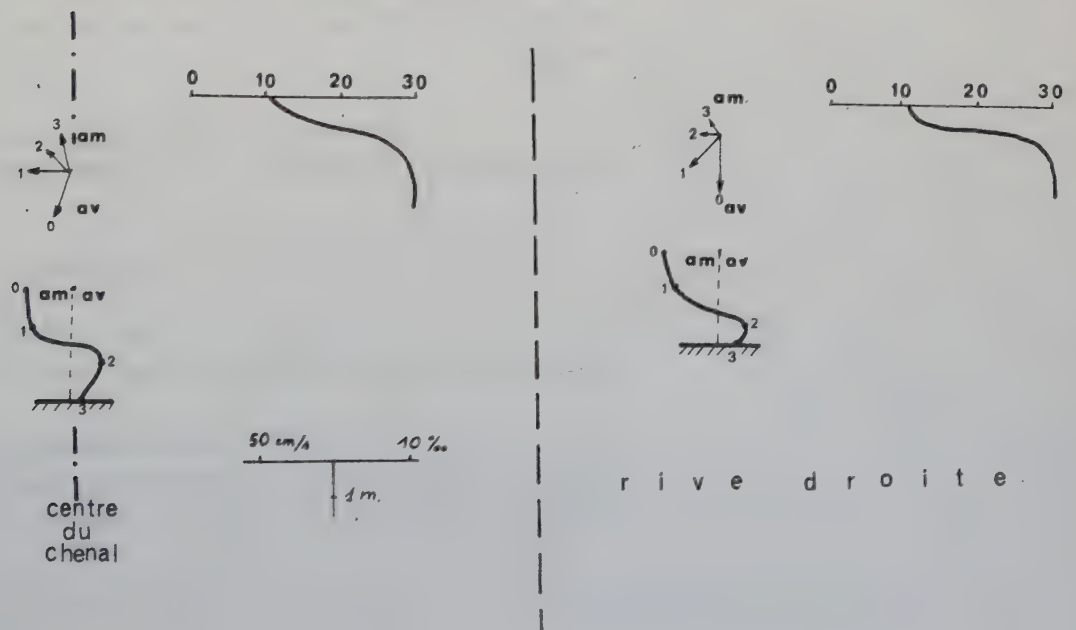
Un premier élément de réponse est fourni par l'allure de la poussée du flot en surface, les eaux claires venues du large repoussent en flot les eaux saumâtres plus turbides, constituant ainsi une visualisation du phénomène. De nombreuses photos prises du Pont du Bonhomme représentent ces figures de flot dont l'allure générale est celle de paraboles successives (cf. annexe, p.76). Le courant est donc maximum au centre du chenal.

Mais en jasant rien n'est visible et surtout dans le cas de la formation d'un système à deux couches, une expérimentation est nécessaire.

Ainsi, le 31/7/67, en coefficient de marteau (38) avec un débit à Polvern de $7 \text{ m}^3/\text{s}$, trouvait-on au point 6 des courants de fond dirigés vers l'amont, cinq heures après la pleine mer.

La figure 5-5 ci-dessous décrit l'allure des courbes de vitesse et de salinité au centre du chenal et sur la rive droite.

Fig. 5-5



Sur la rive droite, par profondeur moindre, le courant de surface est plus rapide que dans le chenal, les formations de courant vers l'amont moins accentuées, l'halocline beaucoup plus marquée.

5 - 3 - 3 - 2 . Question :

La distribution latérale de la salinité est-elle soumise à la force de Coriolis ?

Aucun exemple de dissymétrie caractéristique, avec les eaux douces longeant la rive droite n'a pu être mis en évidence. Dans la zone où le cours du Blavet est sinueux, la présence de masses d'eaux douces contre une rive ou contre l'autre est remise en question à chaque méandre. Les salinités de surface sont très irrégulières dans le détail.

En aval du Pont du Bonhomme, entre les points 5 et 6, une mesure le 16/8/67 (coefficient 51, débit $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$) a donné, 1 h.30 après la pleine mer, les résultats suivants :

Centre du chenal : $S = 23 \text{ o/oo}$

Rive droite : $21,0 < S < 22,0$

Rive gauche : $20,5 < S < 21,5$

Les salinités les plus élevées sont situées au centre. C'est en quelque sorte la situation inverse de celle qui avait été décrite dans le goulet de Port-Louis, où c'étaient les masses d'eaux les plus douces qui occupaient le centre du chenal.

La force de Coriolis ne semble pas avoir une importance considérable dans cet estuaire étroit.

5 - 3 - 3 - 3 . Question :

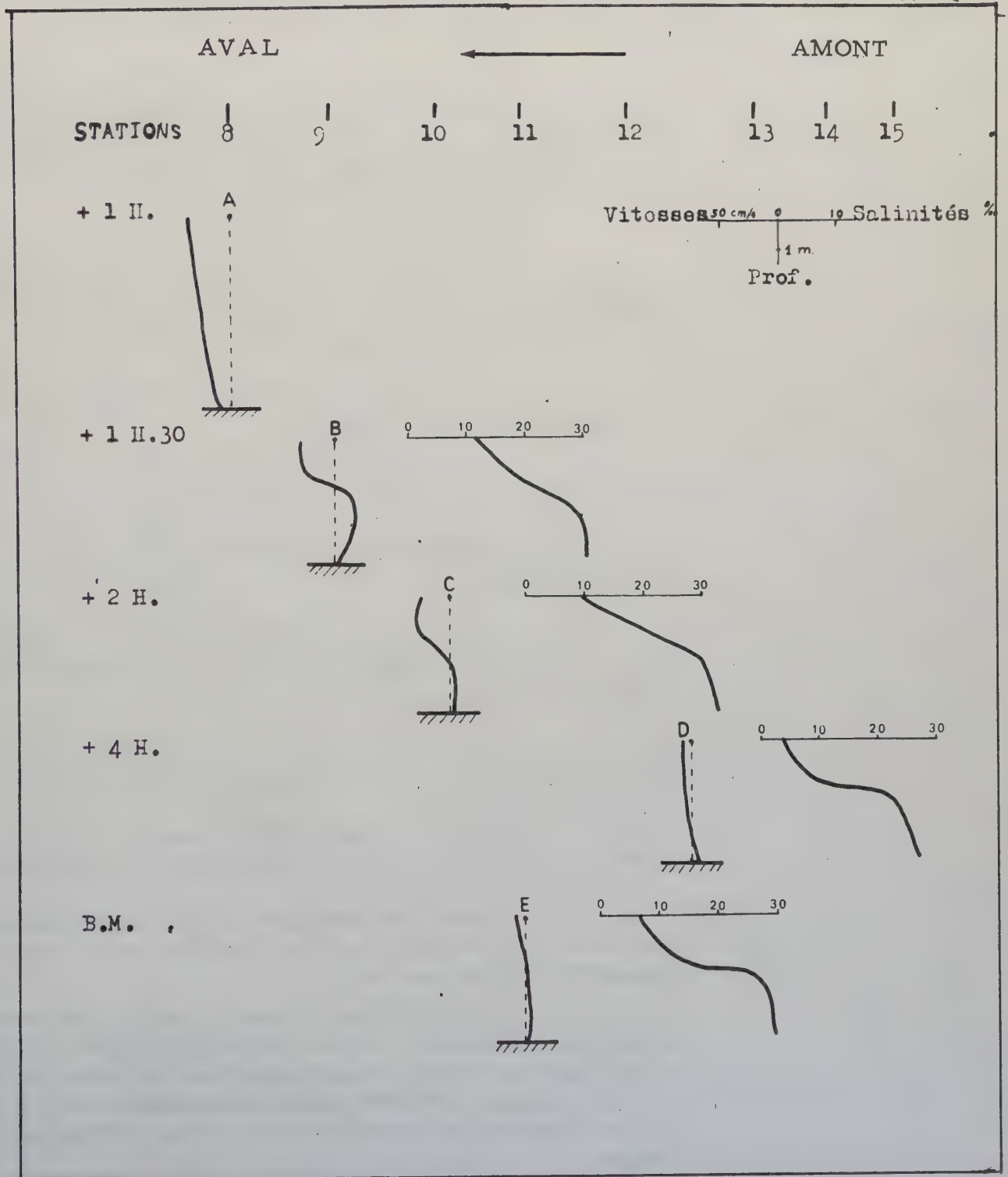
Le système à deux couches et la lentille immobile sont-ils deux structures hydrodynamiques différentes ?

Pour décrire la situation d'ensemble d'un estuaire à un instant donné, il faut pouvoir disposer d'un grand nombre de bateaux placés en station.

Toutefois, vu les dimensions réduites de cet estuaire, on peut avec un seul bateau se déplaçant assez rapidement obtenir des renseignements qui donnent au moins une allure générale du phénomène.

Ainsi, la figure 5-6 montre les diverses coupes de vitesses et de salinités rencontrées en amont du Pont du Bonhomme par coefficient de 49 et débit de $8,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

FIG 5.6



Au Pont du Bonhomme (profil A, une heure après la pleine mer) le courant est orienté en jusant sur toute la hauteur. Le gradient vertical de salinité est faible. Au banc de Beg-ar-Vir (Point 9, Profil B, 1 h.30 après la pleine mer), on rencontre un "two-layered system" typique avec au fond des courants entre 10 et 18 cm/S.

Plus en amont (Point 10, Profil C), deux heures après la pleine mer, les courants au fond sont très faibles et très irréguliers ; leurs valeurs sont comprises entre 3 et 5cm/S. C'est là une description de "lentille immobile". Les profils D et E présentent des phénomènes analogues.

Il n'y a donc pas de solution de continuité entre les deux structures et la lentille immobile serait le prolongement amont de la couche profonde du "two-layered system" avec un affaiblissement progressif des vitesses.

En aval, on trouve des formations de plus en plus homogènes en salinité.

5 - 3 - 3 - 4. Question :

Retrouve-t-on bien ici une forme de lentille caractéristique ?

Une expérimentation du 31.7.67 (coeff.38, débit $7 \text{ m}^3/\text{s}$, vent SSW, 2 à 4 noeuds) est décrite dans la figure 5 - 7 :

La succession A - B - C montre bien la décroissance vers l'aval de l'épaisseur de la couche profonde.

En remontant vers l'amont, C - D - E , la forme en lentille de cette couche apparaît nettement.

Dans cet exemple, comme dans l'exemple précédent, l'halocline n'est bien marquée qu'à l'extrémité "amont" de cette lentille.

A la différence des formations stationnaires de Pritchard et Stommel, formations étudiées dans des régions où le marnage est faible (Chesapeake Bay, un mètre de marée), la couche profonde de cette structure hydrodynamique épouse là, l'allure d'une lentille dont la forme et la position varient dans le temps.

Mise en évidence de la forme lenticulaire de
la structure hydrodynamique de mélange

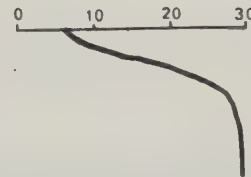
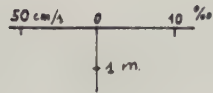
AVAL

AMONT

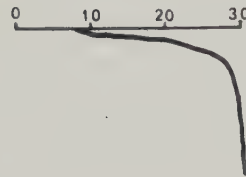
STATIONS.	8	9	10	11	12	13	14	15
-----------	---	---	----	----	----	----	----	----

P M

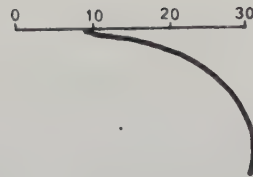
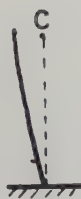
- 1/2 H.



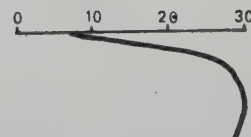
+ 1 H.



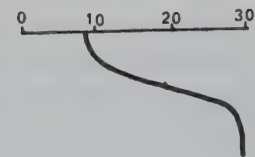
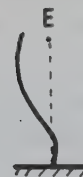
+ 1 H. 30



+ 3 H.



+ 3 H. 30



Coef: 137
Débit: 7 m³/s

Le 31-7-67

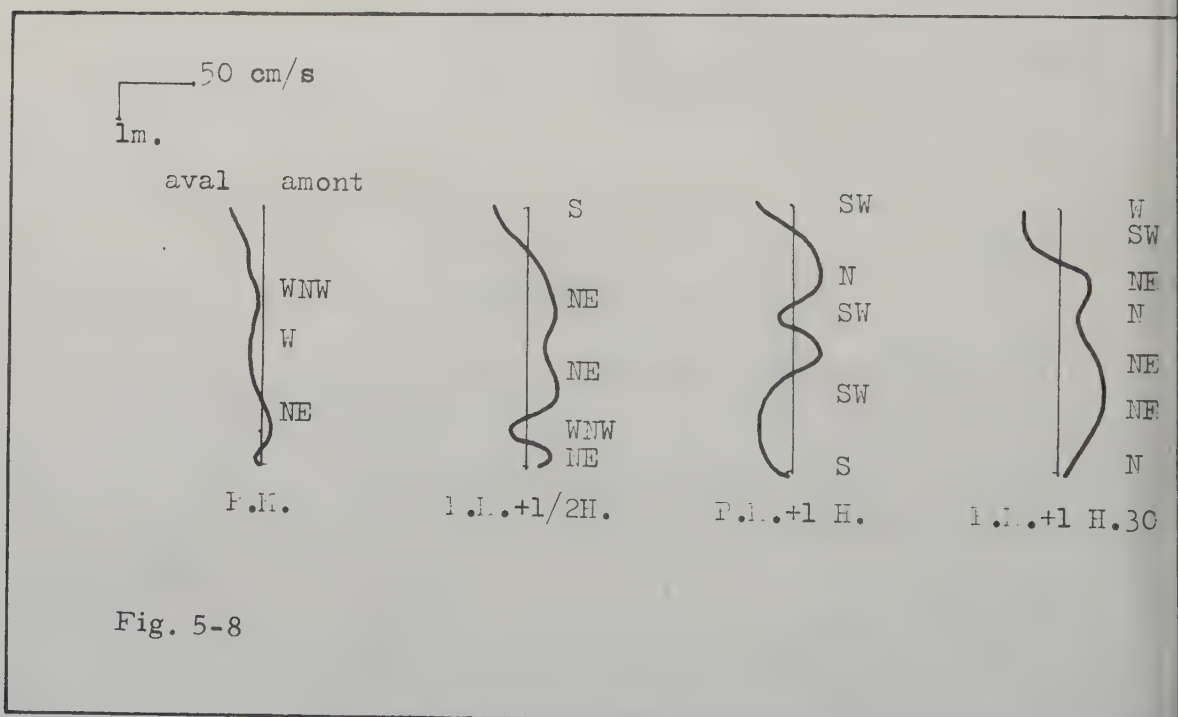
Vent: S.S.W., 2 à 4 noeuds

5 - 3 - 3 - 5. Question :

Les courants de la couche profonde sont-ils une persistance du courant de flot ?

Une étude serrée de début de jusant au point 7 (Pont du Bonhomme), par coefficient de 38 et débit de $8,3 \text{ m}^3/\text{s}$ est représentée dans la figure 5 - 8 ci-dessous.

A la pleine mer, le courant de flot a pratiquement disparu ; une demi-heure et une heure après, se superposent des courants en plusieurs couches, de directions et de sens différents (le vent est SW, force 10 noeuds). Une heure et demi après la pleine mer, la situation en "two-layered system" est bien établie.



On vient donc là d'assister à la naissance de courants de la couche profonde après la disparition des courants de flot. Ces deux courants sont donc bien distincts.

5 - 3 - 3 - 6. Question :

L'interface qui sépare la couche profonde de la couche superficielle constitue-t-elle une véritable barrière entre les deux couches ?

Pour répondre à ce genre de question, il faut utiliser un marqueur, si possible caractérisant bien l'eau douce ou l'eau salée.

Ici, le marqueur utilisé fut la pollution chimique et bactérienne du Blavet fluvial.

Au départ, les teneurs étaient les suivantes :

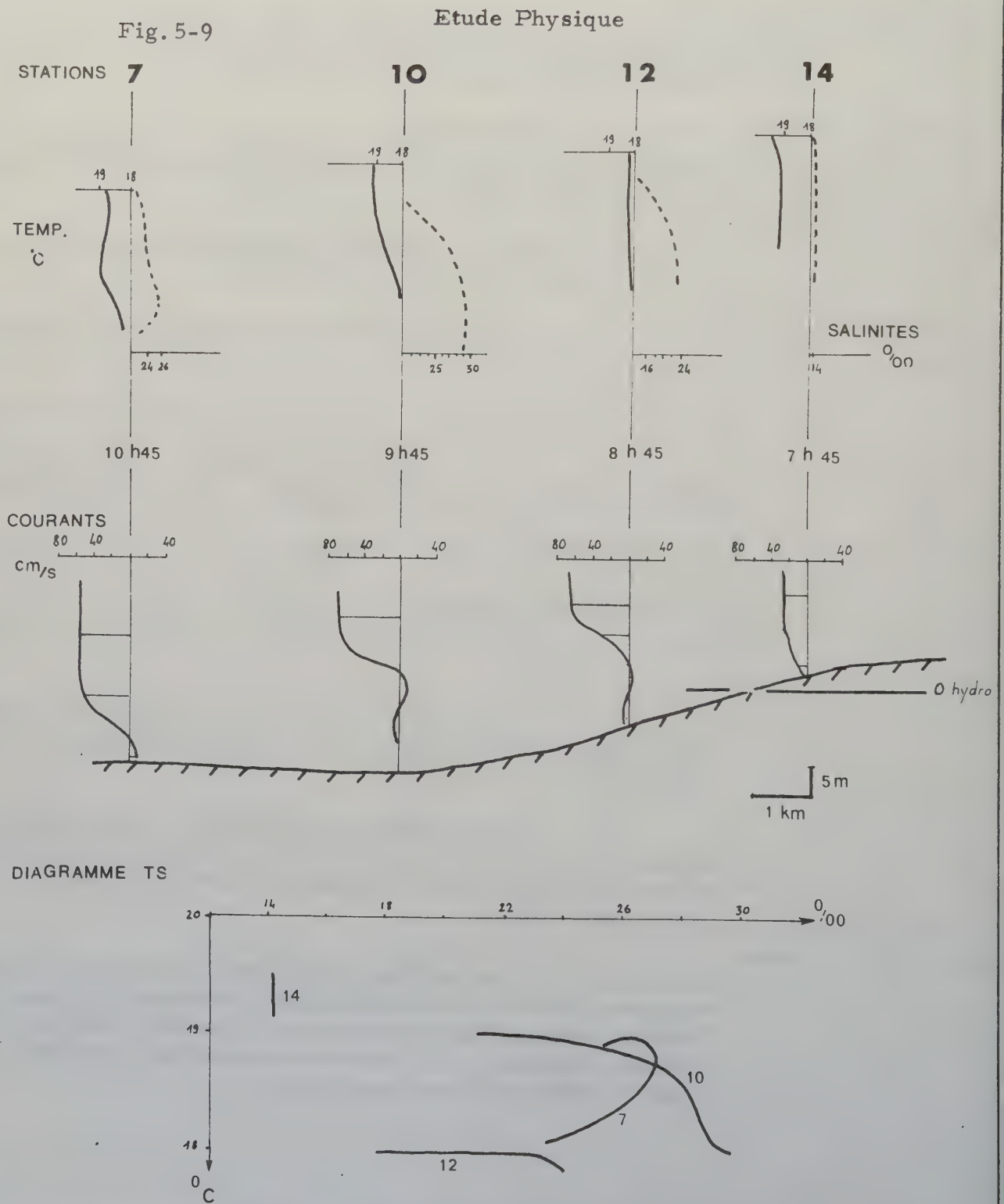
Pour 100 ml.	Amont de l'Ecluse de Polvern	Pen-Mané (Pt.n°3) à mi-flot
Coliformes	1.040.000	1.300
Escherichia coli	420.000	600
Streptocoques Fécaux	29.000	200

A Pen-Mané les teneurs en bactéries apportées par le flot sont très faibles, les égouts de Lorient ne déversant leurs effluents qu'au jusant.

Pour chiffrer la diffusion de cette pollution, une masse d'eau fut suivie de la pleine mer à la mi-jusant, et d'Hennebont au Pont du Bonhomme, (soit du point 14 au point 7) le 13 Août 1968.

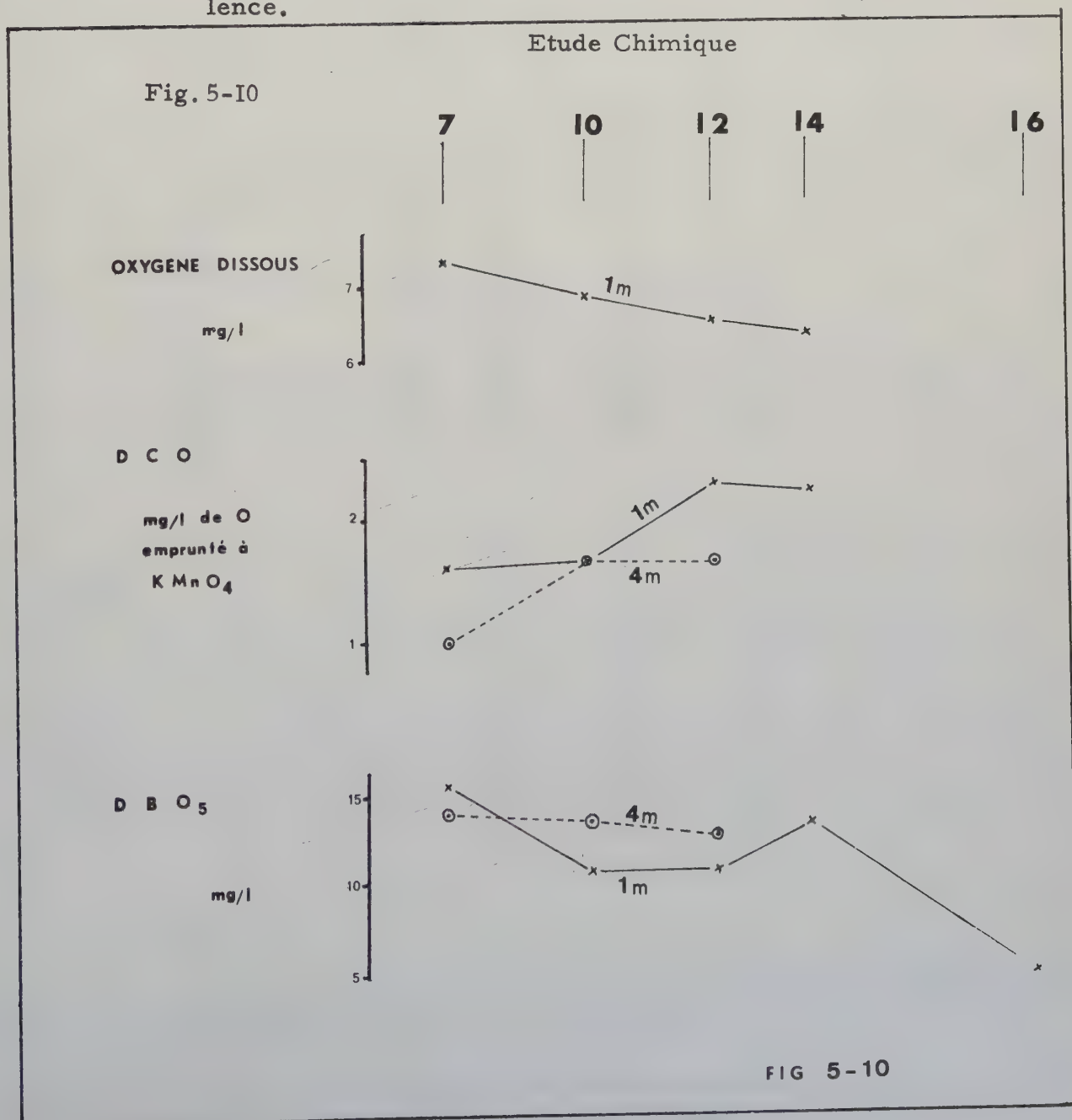
Des stations successives ont été ainsi effectuées, espacées dans le temps, de façon à retrouver à chaque station l'eau de surface (ou du moins ce qu'elle était devenue) de la station précédente. La vitesse moyenne du bateau était donc égale à celle de l'eau superficielle.

La figure 5-9 montre bien dans ses différents graphiques (Etude Physique) la complexité du phénomène aux stations des points 12, 10 et 7. Les diagrammes T.S. (températures - Salinité) sont notamment très parlants.



Au départ, au point 14, l'eau est homogène en salinité ; c'est une eau demeurée au repos pendant la durée du flot, bloquée contre l'écluse. Au point 12, elle est homogène en température et plus froide ; c'est l'eau du flot précédent qui redescend vers l'aval. Aux points 7 et 10, les diagrammes T.S. caractérisent des eaux en cours de mélange.

La figure 5-10 décrit la variation des indicateurs chimiques de pollution. La teneur en oxygène dissous des eaux superficielles croît régulièrement de l'amont (où les valeurs sont très basses : 6,2 mg/l) vers l'aval. Les eaux s'aèrent donc de plus en plus sous l'action probable d'une forte turbulence.

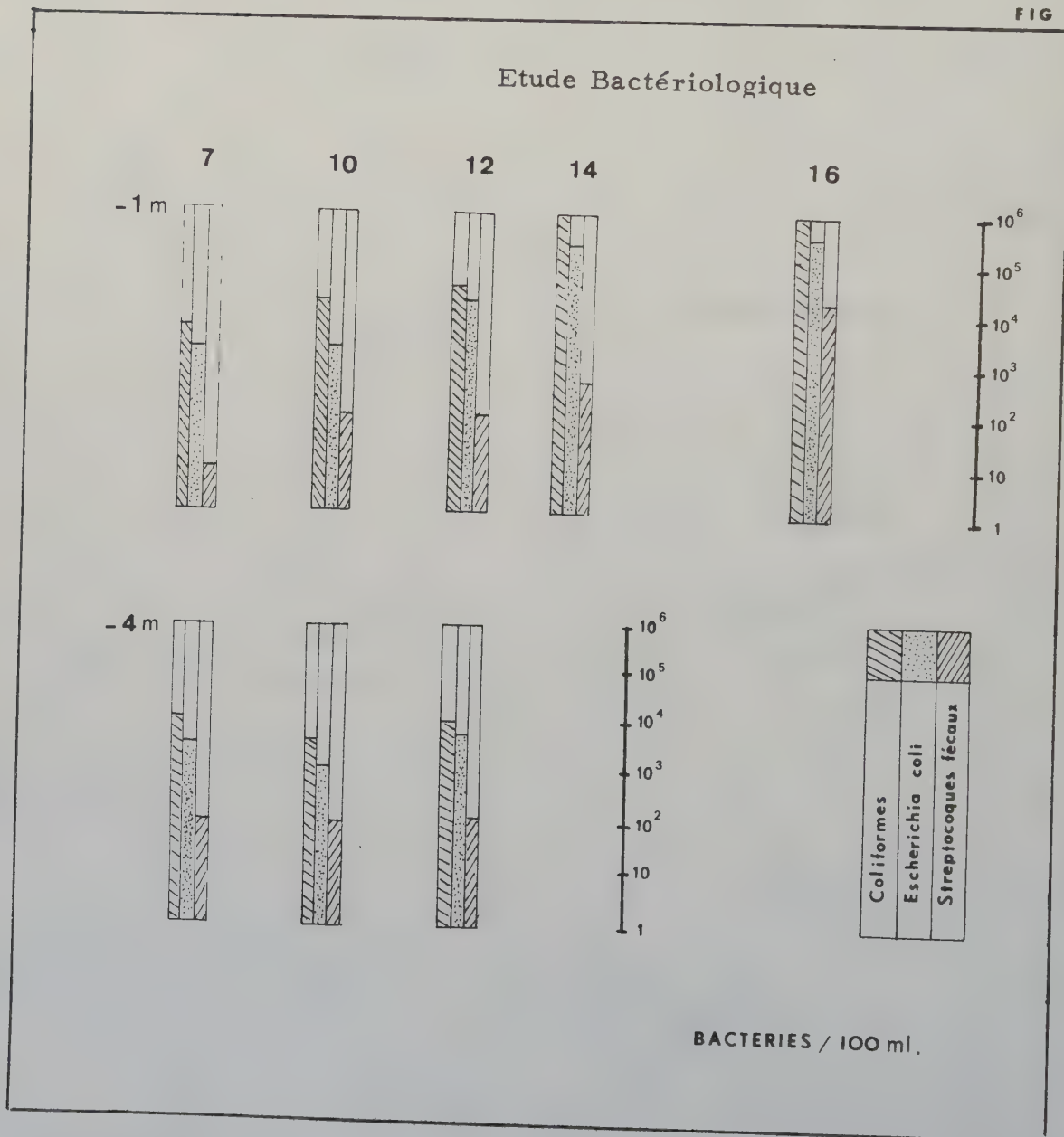


La D.C.O. et la D.B.O.5., déterminées en surface et à - 4 mètres, présentent des variations qui sont moins simples et même parfois contradictoires. Toutes deux sont liées au taux de matières organiques en suspension dans l'eau et ce dernier ne semble pas suivre de loi de proportionnalité.

De plus, les échantillons d'eaux prélevées à - 4 mètres, aux points 12 et 10, l'ont été dans la couche profonde ; au point 7, à la limite inférieure de la couche superficielle.

L'étude bactériologique (fig.5-11) démontre bien que ces deux couches ne sont pas indépendantes.

FIG 5.11



D.C.O. = Demande chimique d'Oxygène

D.B.O 5 = Demande biochimique d'Oxygène en 5 jours

Ainsi, l'eau froide et salée de la couche profonde, qu'on s'attendrait à trouver aussi pure qu'à Pen Mané, contient plus de colonies par millilitre que les eaux de surface.

Les bactéries d'origine humaine (coliformes, *Escherichia Coli*, *Streptocoques fécaux*) bien qu'en moins grand nombre dans la couche montante que dans la couche descendante, atteignent une concentration dix fois plus élevée qu'à l'entrée du Blavet en flot.

Sous l'action bactéricide de l'eau de mer, il y a décroissance générale vers l'aval de la pollution.

La vitesse de décantation des bactéries pouvant être négligée, il faut bien admettre la possibilité d'échanges de molécules d'eau entre le fond et la surface de cette formation en lentille.

5 - 3 - 4 - Premier essai de synthèse

Avant de tenter de relier quantitativement les divers paramètres entre eux, il convient de rassembler ces quelques renseignements concernant la circulation et la diffusion dans l'estuaire.

5 - 3 - 4 - 1. La circulation

On trouve de l'aval vers l'amont :

- une zone à courants alternatifs sur toute la hauteur, où le gradient vertical de salinité est faible ou nul ;

- une zone d'équilibre où se forme en jusant une lentille d'eau plus salée occupant le fond du chenal. Dans cette lentille, les eaux sont animées de mouvements dirigés vers l'amont. Ces courants, relativement forts à l'extrémité aval de la lentille, vont en s'affaiblissant vers l'amont.

Les eaux de surface, s'écoulent, elles, normalement vers l'aval.

- une zone très en amont, en aval de l'écluse, où les eaux sont, soit immobiles (flot), soit dirigées vers l'aval (jusant).

Les stations au point fixe montrent qu'en cours de jusant, cette lentille glisse lentement vers l'aval.

Une observation semble indiquer la présence de deux lentilles successives dans l'estuaire.

La position moyenne de la lentille n'est pas fiable de façon simple à des données immédiates comme le débit du fleuve ou le coefficient de marée.

De simples observations ne permettent pas de déterminer si elle se forme toujours.

Les courants dont la lentille est le siège ne sont pas une persistance du courant de flot. Bien qu'ils se forment souvent lorsque le gradient vertical de salinité est grand, la présence d'un fort gradient n'implique pas obligatoirement celle d'une lentille.

La lentille se forme le plus souvent dans la partie étroite de l'estuaire.

Cette lentille, profonde et située au centre du chenal, semble exercer une action de freinage des eaux superficielles ; le courant a donc tendance à se renforcer près des berges.

En aval de la lentille par contre, les forces de frottement latérales redeviennent prédominantes.

Enfin, la circulation générale de l'estuaire semble liée non seulement au vent local mais encore au vent régional.

5 - 3 - 4 - 2. La diffusion

Certaines coupes verticales de salinité présentent des paliers caractérisant la présence de deux masses d'eaux : une masse d'eau superficielle saumâtre, une masse profonde plus salée.

Les paliers les plus marqués sont situés à l'extrémité amont de la lentille d'équilibre.

Au centre de cette formation, le gradient vertical de salinité, pour être très fort, est cependant moins important.

Ce gradient décroît vers l'aval et l'on peut trouver des structures à deux couches sans palier vraiment net.

La diffusion de bactéries sous entend l'existence d'apports d'eaux polluées superficielles dans la couche profonde dans la couche superficielle, et vice-versa. Il faut donc envisager des mouvements verticaux au sein de cette lentille.

5 - 4 - ETUDE THEORIQUE DE LA LENTILLE DANS L'HYPOTHESE D'UN PHENOMENE DE CONVECTION PAR GRAVITE.

Les travaux de RATTRAY et HANSEN (1962) fournissent, lorsque certaines conditions sont réalisées, une solution tenant compte de la circulation et de la diffusion et mettant notamment en jeu un phénomène de convection de densité analogue au phénomène de convection thermique.

Si ces solutions théoriques se rapprochent ici des résultats mesurés, l'hypothèse de mouvements verticaux dans la lentille dus à la convection par gravité, sera vérifiée.

Or, les conditions d'application des calculs de RATTRAY et HANSEN sont réunies ici.

En effet, les simplifications permettant l'utilisation des équations de RATTRAY et HANSEN, à certaines portions de l'estuaire, si l'on considère les salinités moyennes sur un cycle de marée, sont :

- a) la différence de salinité entre surface et fond est constante,
- b) le gradient horizontal de salinité est proportionnel à x , unité de longueur de l'estuaire.

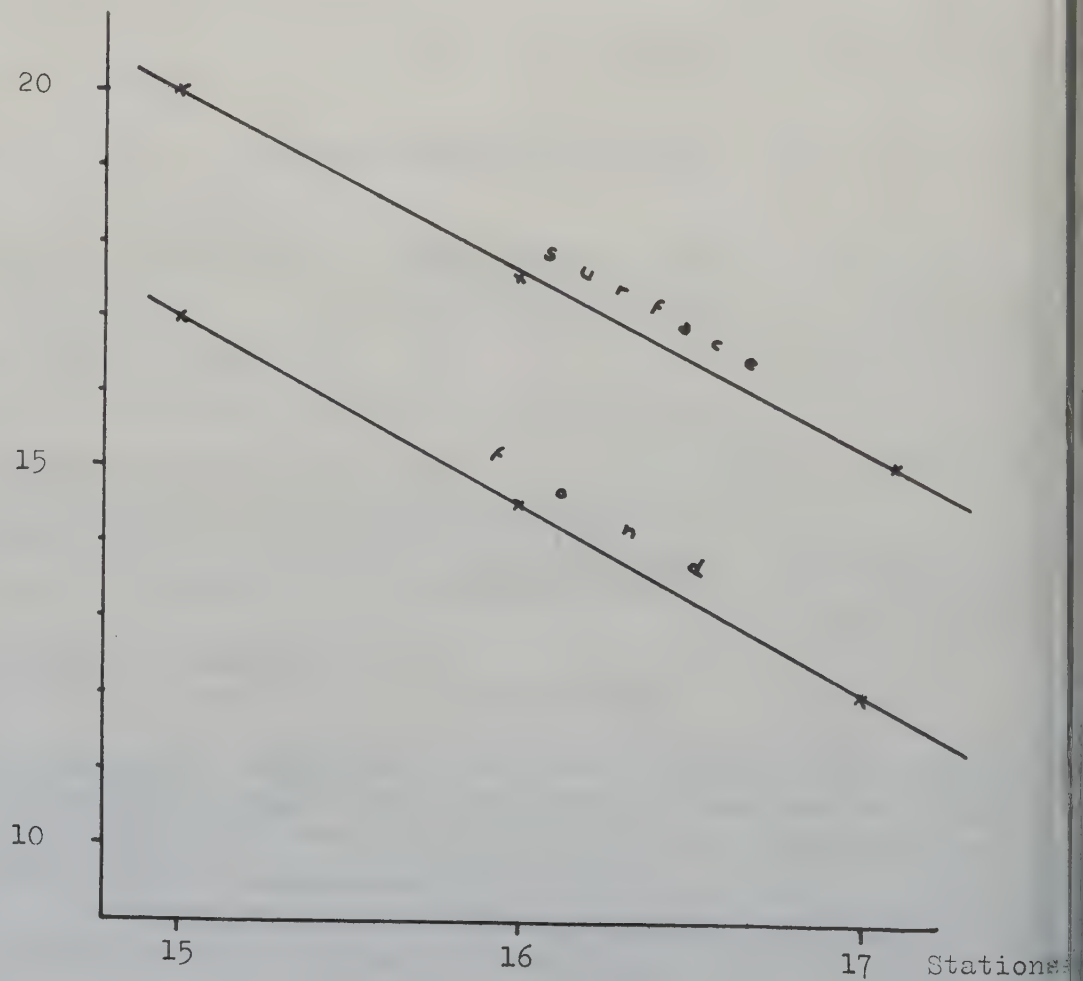
Les stations 15, 16, 17 bien que non simultanées, sont cependant les plus comparables :

- elles furent exécutées, à la suite, en trois jours ;
- le débit d'eau douce est resté constant ;
- les coefficients de marée sont très proches.

Compte tenu de ces approximations, les valeurs reportées sur la figure 5-12 ci-dessous, satisfont assez bien aux conditions demandées.

Fig. 5-12

Salinité moyenne
sur une marée.



5 - 4 - 1. Rappel de la Théorie de RATTRAY et HANSEN

Les travaux de RATTRAY et d'HANSEN (1962, 1968) reprennent les observations et les synthèses de PRITCHARD (1953 à 1958).

Ce dernier avait étudié, dans la Baie de Chesapeake, une circulation du type "à deux couches". Le premier, il tenta de représenter à la fois la circulation et la diffusion dans un estuaire par un système d'équations de différentielles partielles.

Si ces équations n'admettent aucune solution théorique, RATTRAY et HANSEN ont montré que pour certains estuaires ou certaines portions d'estuaire, des solutions de type analogique pouvaient être envisagées.

Pour un phénomène stationnaire, les conditions d'application sont les suivantes :

- l'estuaire doit être étroit, sa section est supposée rectangulaire et sa profondeur constante.

Ses paramètres géométriques sont alors :

b_0 : largeur
 h_0 : profondeur.

- l'estuaire est homogène latéralement. (L'action de la force de Coriolis est donc négligeable).

- le débit de la rivière R_0 est constant.

- μ , le facteur de turbulence (eddy viscosity) est supposé constant (tout au moins sur la période d'intégration).

- Quant aux deux composantes du coefficient de diffusion turbulente (eddy diffusivity) :

- l'une K_z (coefficient vertical) est supposée constante,
- l'autre K_x (coefficient horizontal) a un gradient vers la mer égal au débit d'eau douce par unité de section.

Le mouvement au fond est supposé nul et en surface, les forces de cisaillement sont égales à la force d'entraînement du vent.

Les équations de départ sont les équations de continuité dont les variables sont des moyennes sur un ou plusieurs cycles de marée : (PRITCHARD, 1953)

$$\frac{\partial}{\partial x} (b u) + \frac{\partial}{\partial z} (b w) = 0 \quad (1)$$

$$b \left(u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (b K_x \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (b K_z \frac{\partial S}{\partial z}) \quad (2)$$

avec S : salinité moyenne,
 u et w : respectivement composantes horizontales et verticales de la vitesse moyenne,
 x : positif vers la mer,
 z : positif vers le fond.

Reprenant les équations d'équilibre dynamique de l'estuaire (PRITCHARD, 1956) :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

et :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g \quad (4)$$

avec p : pression,
 g : accélération de la pesanteur,
 ρ : masse spécifique de l'eau,
 τ : tension turbulente.

En éliminant p entre (3) et (4) et en appliquant l'approximation de BOUSSINESQ, il vient :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (5)$$

RATTRAY et HANSEN posent ensuite que salinité et densité sont simplement reliées par :

$$\rho = \rho_0 \left(1 + k \frac{S}{S_1} \right)$$

ρ_0 = densité de l'eau douce,

S_1 = salinité de référence (ex. : eau de mer)

Ils introduisent alors une fonction de courant, ou plus exactement une fonction de "débit" :

$$\psi \text{ telle que : } \frac{\partial \psi}{\partial z} = -b u \quad (6))$$

$$: \frac{\partial \psi}{\partial x} = b w \quad (7)$$

$$\text{De plus : } \frac{S}{S_1} = \theta$$

Les équations (2) et (5) deviennent :

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (b K_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (b K_z \frac{\partial \theta}{\partial z}) \quad (8)$$

et :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[\mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{b} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] + k \cdot g \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

RATTRAY et HANSEN remarquent alors la similitude existant entre ces équations et celles régissant les problèmes de frontières thermiques. Ils les résolvent par les mêmes méthodes analogiques.

Ils introduisent alors des coordonnées sans dimension. Ils considèrent tout d'abord le mouvement moyen et la salinité moyenne S_m sur une section.

$$\text{Donc } u = \frac{R_0}{b h_0}$$

et l'équation de la diffusion (2) devient :

$$\frac{R_0}{h_0} \cdot \frac{d S_m}{d x} = \frac{d}{d x} (b K_{x_m} \cdot \frac{d S_m}{d x})$$

où K_{x_m} représente la diffusion horizontale résultante sur la section.

Il s'exprime ainsi : $K x_m = \frac{R_o \cdot S m}{b h_o} \cdot \frac{d x}{d S m}$

RATTRAY et HANSEN posent pour finir l'hypothèse supplémentaire : $b = b_o = \text{Cte.}$

On a alors : $K x_o = \frac{R_o S}{b_o h_o} \frac{d x}{d S}$

et l'on peut introduire les coordonnées sans dimension suivantes :

$$\eta = \frac{z}{h_o} \quad \bar{x} = \frac{R_o x}{b_o h_o \cdot K x_o}$$

En tenant compte des hypothèses de la page 127, les solutions sont les suivantes :

$$\theta = (\bar{x} - \bar{x}_o) + x(\eta) \quad (10)$$

$$\psi = R_o \varphi(\eta) \quad (11)$$

avec : $x(\eta) = \frac{1}{M} \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} - \int_0^\eta \varphi(\eta) d\eta \right) \quad (12)$

$$\text{et } \varphi(\eta) = \frac{1}{2}(2-3\eta + \eta^3) - \frac{T}{4}(\eta - 2\eta^2 + \eta^3) - \frac{Ra}{48}(\eta - 3\eta^3 + 2\eta^4) \quad (13)$$

où : $M = \frac{K x_o K z}{(R_o/b_o)^2}$

et : $T = \frac{h_o^2 b_o \tau}{\rho_o \mu R_o}$ (τ étant la force d'entraînement du vent)

Enfin : $Ra = \frac{k g h_o^3}{\mu K x_o}$

Ra est l'analogie pour la circulation estuarienne du nombre de RAYLEIGH de la Théorie de convection thermique.

5 - 4 - 2 . Application à un état non stationnaire

5 - 4 - 2 - 1. Méthode pratique

Il paraît bien difficile d'utiliser les résultats de cette théorie à l'étude de phénomènes aussi fugitifs que ceux décrits plus haut.

RATTRAY et HANSEN ont de plus travaillé sur des résultats de mesures dans des estuaires très importants et à très faible marnage (1 mètre).

L'adaptation présentée ci-dessous devra donc être considérée comme une simple expérimentation. Si une bonne concordance est constatée entre résultats calculés d'après cette théorie et résultats observés, on en déduira que la théorie de RATTRAY et HANSEN met bien en lumière les phénomènes physiques essentiels de cet estuaire. Si des divergences apparaissent, elles seront attribuées à des simplifications abusives ou à la mise en jeu d'autres phénomènes et guideront ainsi des recherches futures.

Une adaptation est donc possible avec les hypothèses suivantes :

- la période d'intégration des différents paramètres (vitesse ou salinité) sera toujours limitée à un cycle de marée.

- la profondeur h_0 sera considérée en un point comme égale au niveau moyen, augmenté de la hauteur d'eau sous le zéro hydrographique.

- la largeur b_0 sera mesurée au niveau moyen.

L'équation (9) indique qu'au point de cote $\eta = \frac{z}{h_0}$

donnée, on trouve ainsi comme vitesse moyenne, sur un cycle de marée :

$$u = -\frac{d\varphi}{d\eta} \cdot \frac{R_0}{b_0 h_0}$$

On tire $-\frac{d\varphi}{d\eta}$ de (1),

$$-\frac{d\varphi}{d\eta} = \frac{3}{2} (1-\eta)(1+\eta) + \frac{T}{4} (3\eta - 1)(\eta - 1) + \frac{Ra}{48} (\eta - 1)(8\eta^2 - \eta - 1) \quad (14)$$

Cette équation est en fait très maniable.

Le facteur de T s'annule pour $\eta = 1$

$$\eta = 1/3$$

Le facteur de Ra ($8\eta^2 - \eta - 1$),
a une solution positive : $\eta = 0,42$.

A cette profondeur,

$$-\frac{d\varphi}{d\eta} = 1,23 - 0,037 T.$$

Ce résultat est important. Pour $\eta = 0,42$,
le courant résiduel ne dépend que du débit de la rivière,
et du vent.

5 - 4 - 2 - 2 . Exemple simple de calcul

On peut prendre une mesure avec débit constant
et un état suffisamment stationnaire pour que le même phéno-
mène se reproduise pendant trois jours (Ex. : la mesure n°16
du 15/10/66). On peut alors intégrer les vitesses sur un cycle
de marée aux profondeurs suivantes :

$$z/h = 0,1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6, 1.$$

On obtient alors, de la même façon qu'au
chapitre 3, le courant résiduel sur un cycle de marée mais à
différents niveaux (voir figure 5.13).

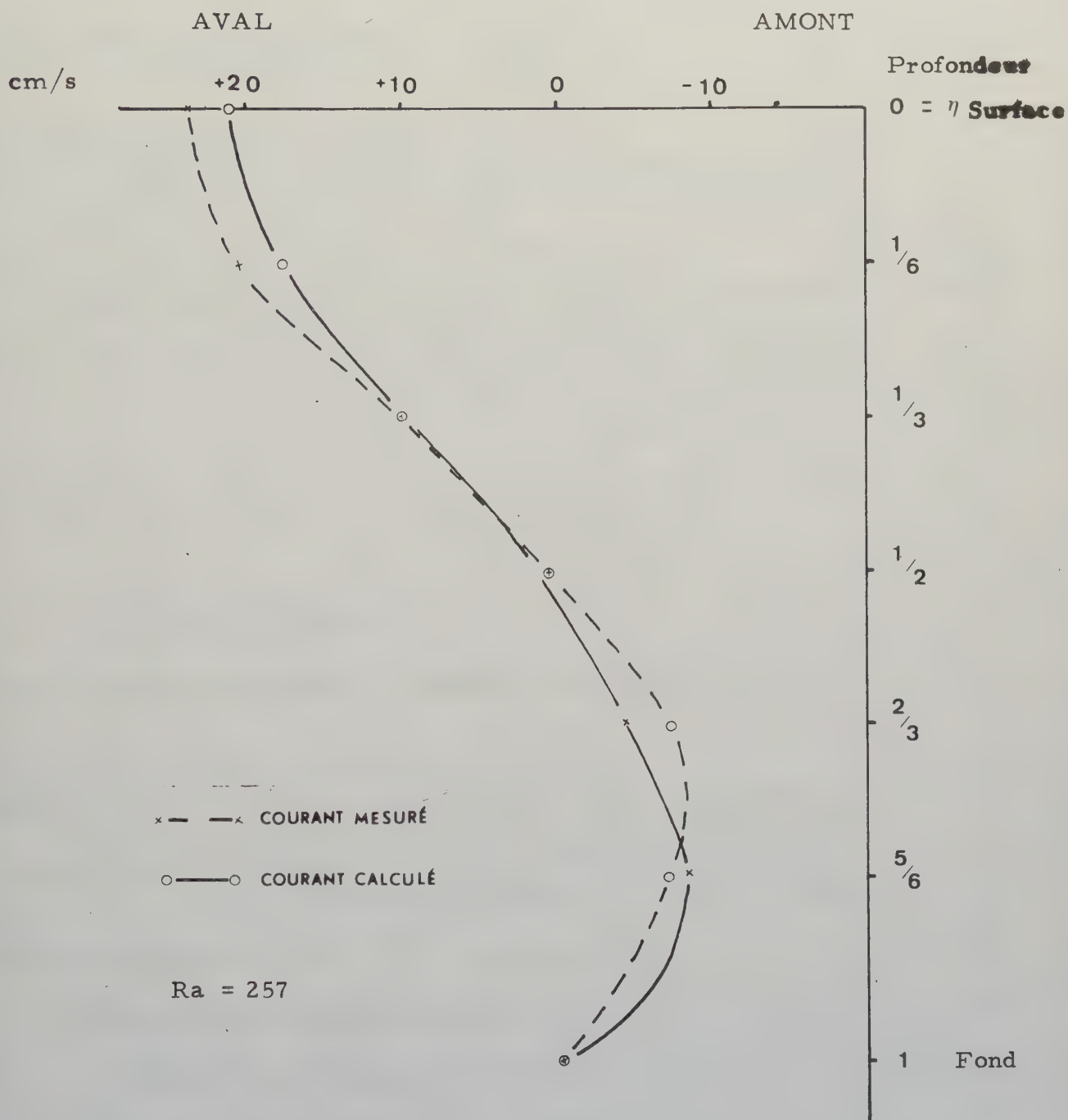
L'équation (14) permet de calculer $-\frac{d\varphi}{d\eta}$

pour les différentes profondeurs ci-dessus.

Pour calculer Ra sur une seule donnée, il faut
éliminer T, et par conséquent utiliser le courant résiduel mesuré
pour $\eta = 1/3$. On obtient ainsi $Ra = 257$.

FIG 5.13

Champ vertical du courant créé par le mélange des eaux douces et salées.



COURANT RESIDUEL SUR UN CYCLE DE MAREE

D'ailleurs, T peut être négligé, la mesure ayant eu lieu par des vents faibles en un site très abrité.

Les courbes calculées et mesurées (v. Fig. 5-13) sont très voisines et leur allure générale est identique - on ne peut guère espérer mieux avec les approximations de départ-.

La principale leçon à en tirer est la suivante :

Dans cette mesure, des résultats en bonne concordance avec l'expérience ont été obtenues en considérant que la formation d'une structure d'équilibre hydrodynamique en deux couches de courants superposés était due à l'importance des forces de convection par gravité.

5 - 4 - 3. Confrontation de la théorie de HANSEN avec l'ensemble ----- des mesures. -----

5 - 4 - 3 - 1. Critique de la théorie -----

Cette mesure N°16 était paradoxalement un cas particulier.

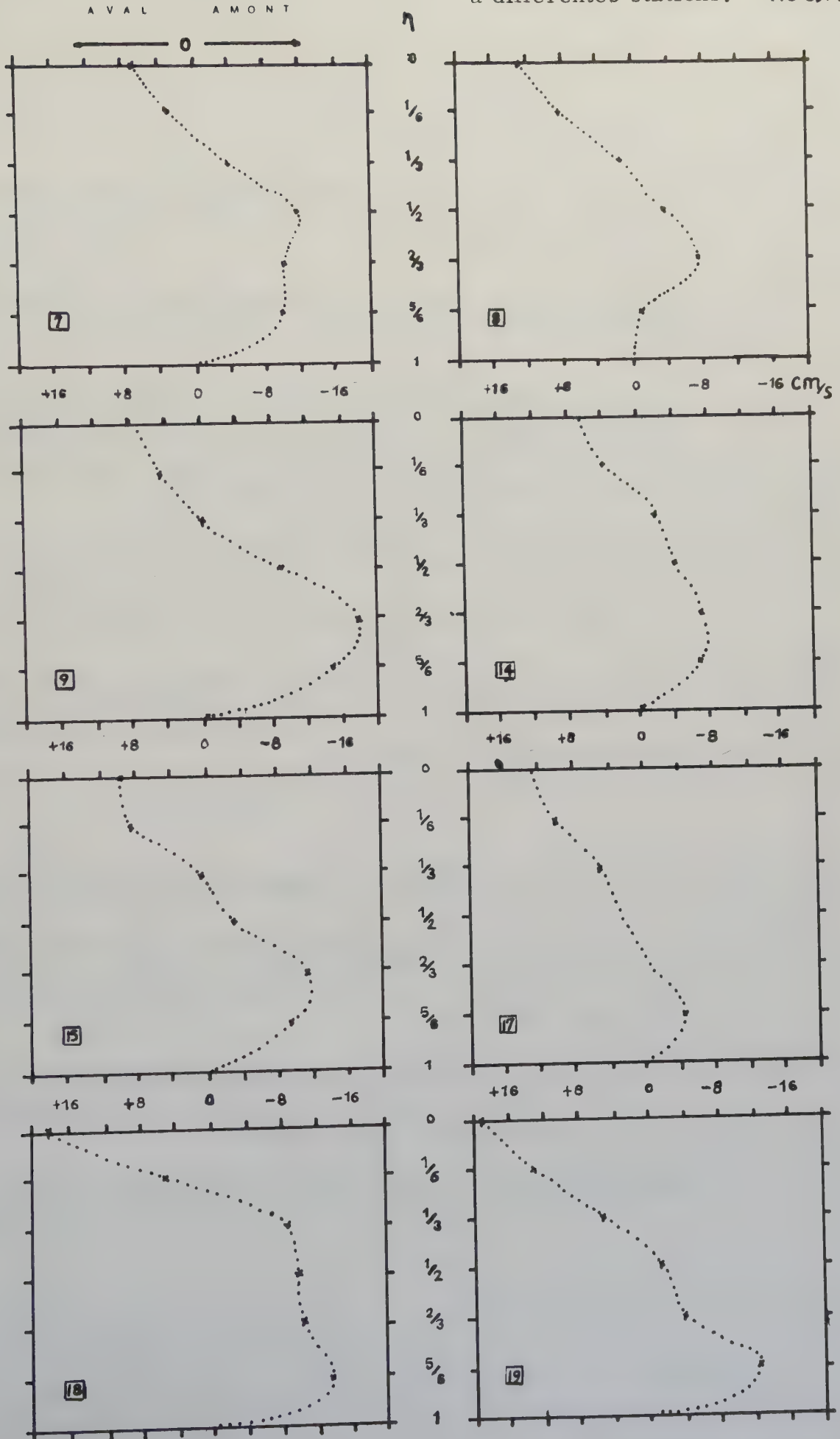
L'examen des courbes de la figure 5-14 montre en effet que le courant résiduel mesuré concorde assez mal (excepté pour la mesure N°17) avec la représentation qu'en donnent RATTRAY et HANSEN. La plupart des courbes théoriques sont incalculables par la méthode du paragraphe 5-4-2-2.

Les mesures 16 et 17 ont des caractères communs :

- elles ont lieu par marée de coefficient 115 ;
- le site de la mesure est très étroit.

Le fort marnage d'une marée de vive eau devrait plutôt constituer un obstacle à l'application des hypothèses de la théorie ci-dessous. La bonne concordance ne doit donc être le fruit que de la bonne approximation constituée par l'assimilation de la coupe transversale de l'estuaire à un rectangle.

Courants résiduels
à différentes stations. FIG 5,14



Dans le cours étroit de la portion amont de l'estuaire où ont eu lieu ces deux mesures, les pentes des berges sont en effet plus fortes.

Dans le cas général, l'assimilation de la coupe transversale de l'estuaire à un rectangle est difficile.

Les erreurs dues à cette différence sont d'autant plus importantes que dans l'estuaire considéré, contrairement aux estuaires étudiés par PRITCHARD, RATTRAY et HANSEN, le marnage est important. Les surfaces mouillées vont donc intervenir et cela d'autant plus que le profil sera plus évasé.

Il y a cependant possibilité, si l'on dispose (ce qui n'est pas le cas pour le Blavet) d'un relevé topographique sous-marin précis, de recréer, par le calcul, un "estuaire équivalent" à l'aide de la détermination, heure par heure, de ces surfaces mouillées.

De tels calculs, possibles avec des moyens modernes, n'entrent pas dans le cadre de cette étude axée sur la description d'un environnement sédimentologique, mais peuvent constituer un axe de recherche futur.

5 - 4 - 3 - 2.

Apports de l'expérimentation de cette théorie.-

Cette expérimentation a montré qu'il était possible dans certains cas, de définir l'état de l'estuaire par un simple nombre Ra . D'après RATTRAY et HANSEN, il caractérise la circulation de l'estuaire :

- Pour $Ra < 30$, l'écoulement résiduel est du type parabolique. Les courants sont alternatifs, portant vers l'amont en flot et vers l'aval en jusant, sur toute la hauteur.
- Pour $Ra > 30$, il se forme en jusant un système à deux couches de courants, les courants de la couche inférieure portant vers l'amont

L'expression de Ra :

$$Ra = \frac{k g h_o^3}{\mu K x_o}$$

où si l'on exprime $K x_o$:

$$Ra = \frac{k.g.b_o.h_o^4}{\mu R_o.S.} \cdot \frac{d S}{d x}$$

montre bien l'influence prépondérante de h_o sur Ra.

Toutes choses égales par ailleurs, un système à deux couches de courants s'établira donc plus facilement dans les sections profondes d'un estuaire. On voit donc que la détermination de "l'estuaire équivalent" évoquée plus haut pourrait alors permettre la prévision des modifications hydrodynamiques causées par un approfondissement de chenal.

De plus, l'échec de l'application de cette théorie à la plupart des courants résiduels calculés sur un seul cycle de marée conduit à certaines réflexions.

La théorie de RATTRAY et HANSEN s'appliquait à un phénomène stationnaire, il n'y a donc pas lieu de s'en étonner outre mesure.

On supposait notamment que R_o , le débit du fleuve, était totalement expulsé de l'estuaire ; ici, sur un seul cycle, les phénomènes de marée, notamment le déchet et le revif, les courants issus de la circulation littorale et pénétrant dans l'estuaire sont de telles inconnues qu'il est difficile de prétendre qu'il en soit toujours ainsi.

Les mesures de bas estuaire ont déjà montré que les influences de la circulation littorale ne pouvaient être négligées.

Un courant issu de cette circulation peut donc se superposer à un courant de flot et créer une situation d'équilibre de l'estuaire différente de celle qu'aurait créée le courant de marée seul.

L'influence de ce courant littoral cessant, il y aurait alors expulsion des masses d'eaux supplémentaires accumulées dans l'estuaire. C'est peut-être là qu'il faut trouver l'explication des mesures n°6 et n°12 où l'on assiste à un phénomène de vidange° sans qu'il y ait montée en crue du Blavet et du Scorff.

Enfin, cette expérimentation a eu le mérite de montrer que "two-layered system" et "lentille immobile" étaient deux aspects d'un même phénomène.

5 - 5 - CONCLUSION

La circulation de cet estuaire est donc conditionnée par la présence en jusan d'une masse d'eau profonde où l'on note de faibles courants portant vers l'amont.

Cette masse d'eau épouse la forme de lentille, allongée dans le chenal.

Elle est constituée d'eaux plus denses que les eaux superficielles qui s'écoulent normalement vers l'aval. C'est donc une formation hydrodynamique analogue à celle qui fut découverte dans d'autres estuaires (BERTHOIS, 58, 64, 65).

Si, à première vue, les eaux superficielles semblent dévaler sur un interface formant séparation, il y a en fait continuellement apport d'eaux superficielles dans la lentille et vice-versa par suite de phénomènes de convection par gravité.

Les faibles courants portant vers l'amont notés plus haut, sont donc des composantes horizontales de ces mouvements de convection.

Cette lentille a des positions variables tout au long de l'estuaire. Elle est cependant, la plupart du temps, située en amont du Pont du Bonhomme, c'est-à-dire dans la partie la plus encaissée de l'estuaire.

Ce n'est que par faibles coefficients (morte eau) et forts débits qu'elle se place en aval.

La portion de l'estuaire située en aval de cette formation d'équilibre peut être assimilée au type "vertically homogeneous" souvent décrit, avec des courants portant normalement vers l'amont en flot et vers l'aval en jusan.

La portion de l'estuaire située en amont, du fait de la présence d'un barrage-écluse, se comporte de façon particulière : eaux immobiles en flot, coulant vers l'aval en jusant.

La lentille, de plus, pendant un jusant, glisse lentement vers l'aval avant de disparaître.

Cette formation n'est pas sans rappeler les structures hydrodynamiques décrites sous le nom de "two-layered system" par les auteurs américains, bien que ce système à deux couches de courants aient été le plus souvent découvert à l'état stationnaire dans des estuaires à faible marnage.

La théorie de RATTRAY et HANSEN semble ainsi intéressante ; elle s'applique parfois à l'étude d'un seul cycle de marée lorsque le phénomène de lentille se reproduit plusieurs fois de suite et surtout dans des sections d'estuaire qu'on peut considérer, sans simplification abusive, comme rectangulaires.

Il doit être cependant possible de généraliser l'emploi de cette méthode, tout au moins pour des portions limitées d'estuaire, en calculant des "estuaires rectangulaires équivalents".

Il faut, de plus, souligner les développements intéressants de la méthode de ces auteurs permettant l'estimation des coefficients de diffusion turbulente (K_x et K_z), si importants pour la solution des problèmes de pollution.

Enfin, bien que l'estuaire considéré ne communique avec la mer que par un goulet, bien des phénomènes ne trouvent d'explication que si l'on admet l'influence de courants issus de la circulation littorale sur la circulation estuarienne.

CHAPITRE VI

LES APPORTS FLUVIAUX

Régime du Blavet et du Scorff.

Le contexte physique du bassin versant.

Synthèse climatologique.

Conclusion.

6 - 1 - Régime du Blavet et du Scorff

Situés dans une même zone climatique avec des bassins versants au sol et au sous-sol très semblables, ces deux fleuves côtiers présentent beaucoup d'analogies.

6 - 1 - 1. Le Scorff

Son cours est relativement sauvage ; seules quelques retenues de moulin régularisent son débit.

C'est une rivière courte : 76 kilomètres séparent sa source (altitude 230 m) du Pont de Chemin de Fer de Lorient. Sa pente moyenne est donc de 3 o/oo (voir figure 6-1).

La surface de son bassin versant à Pont-Kerlo est 292 km² (voir planche 6-2). A cet endroit, un lim nigraphe installé en 1955 par la Troisième Circonscription Electrique a fourni des résultats permettant de définir le régime de ce fleuve côtier.

Période 1956-1966.

Débits moyens	{ 5,88 m ³ /s 20,1 l/s/km ²
à Pont-Kerlo	

Lame d'eau équivalente : 631,5 mm.

Pendant ces dix années, le débit maximum mesuré fut : 52,5 m³/s

et minimum : 0,5 m³/s.

BASSIN VERSANT DU SCORFF

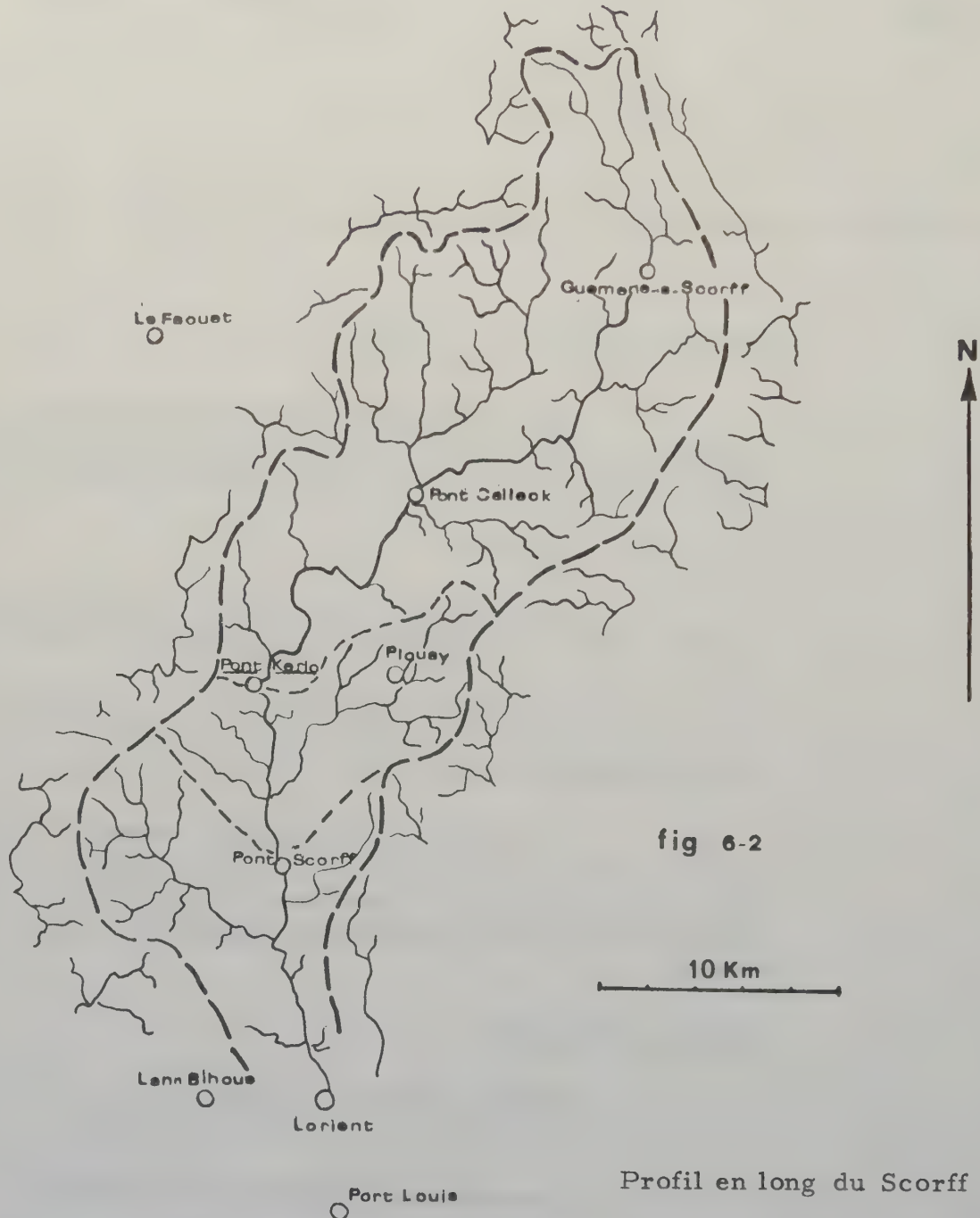


fig 6-2

10 Km

Profil en long du Scorff

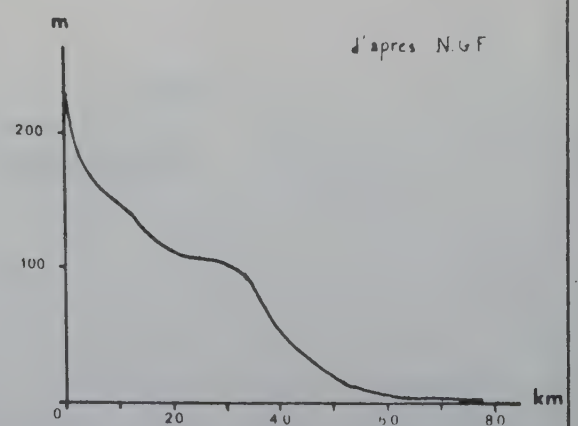
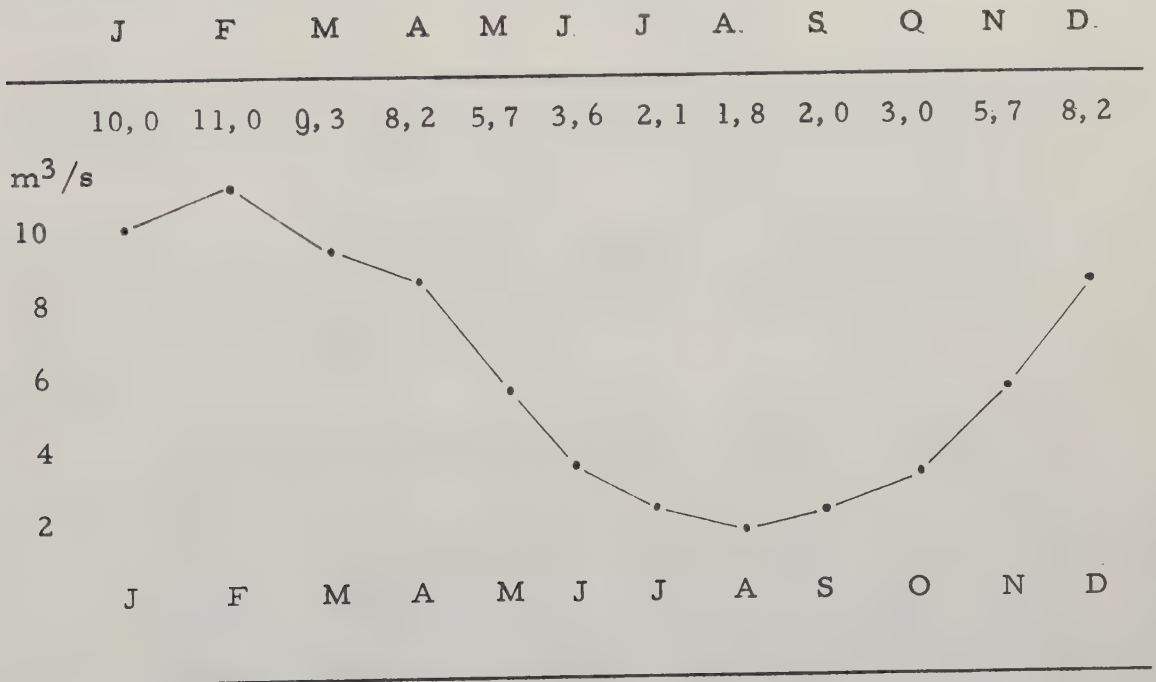


fig 6-1

Les débits moyens mensuels se répartissent ainsi :



-figure 6-3-

Le régime de cette rivière est donc particulièrement simple avec une saison de hautes eaux l'hiver, et une saison de basses eaux, l'été. C'est le régime Atlantique typique.

6 - 1 - 2. Le Blavet

Ses caractéristiques diffèrent légèrement.

C'est en effet un fleuve canalisé sur environ la moitié de son cours depuis 1828. - Entre Guerlédan et Polvern, on ne compte pas moins de 39 biefs. De plus, un barrage hydroélectrique avec son lac de retenue à Guerlédan, constitue un régulateur appréciable.

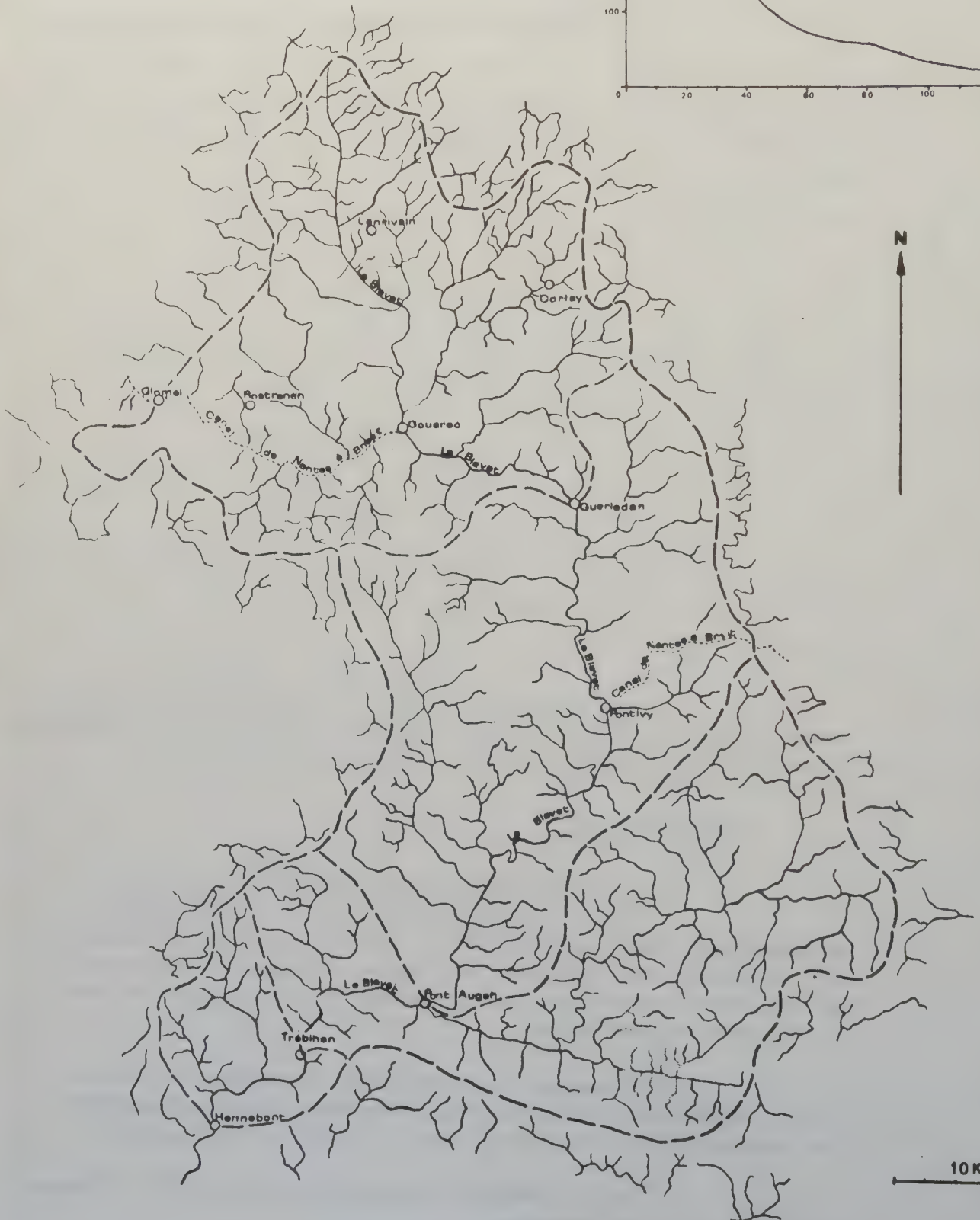
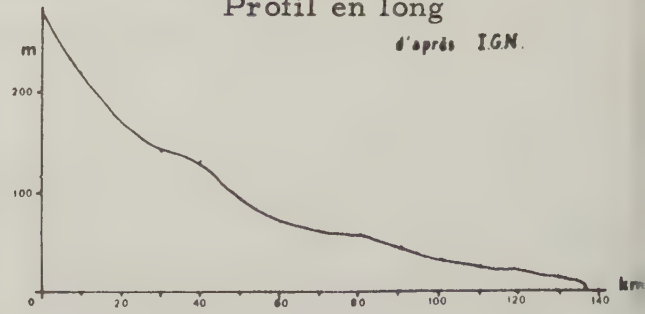
Long de 136 kilomètres, sa source est située à 284 mètres d'altitude. Sa pente moyenne est donc légèrement plus faible que celle du Scorff (env. 2 0/00) - (voir fig.6-4).

Sur son bassin versant de 2.000 km² à Polvern, la pluviométrie est variable ;

BASSIN VERSANT DU BLAVET

Profil en long

d'après IGN.



comprise entre 1000 et 1200 mm/an dans la région des sources, elle tombe à 800 mm dans la région côtière.

Ce n'est malheureusement qu'à Guerlédan, dans la partie amont, que l'on dispose de mesures suivies (depuis 1931). Ce sont les équivalents $\text{m}^3/\text{kw h}$ de l'usine hydroélectrique.

Ces données, bien que non représentatives de l'ensemble du bassin versant (à Guerlédan, le bassin versant n'est que de 620 km^2) donnent une idée du régime de ce fleuve.

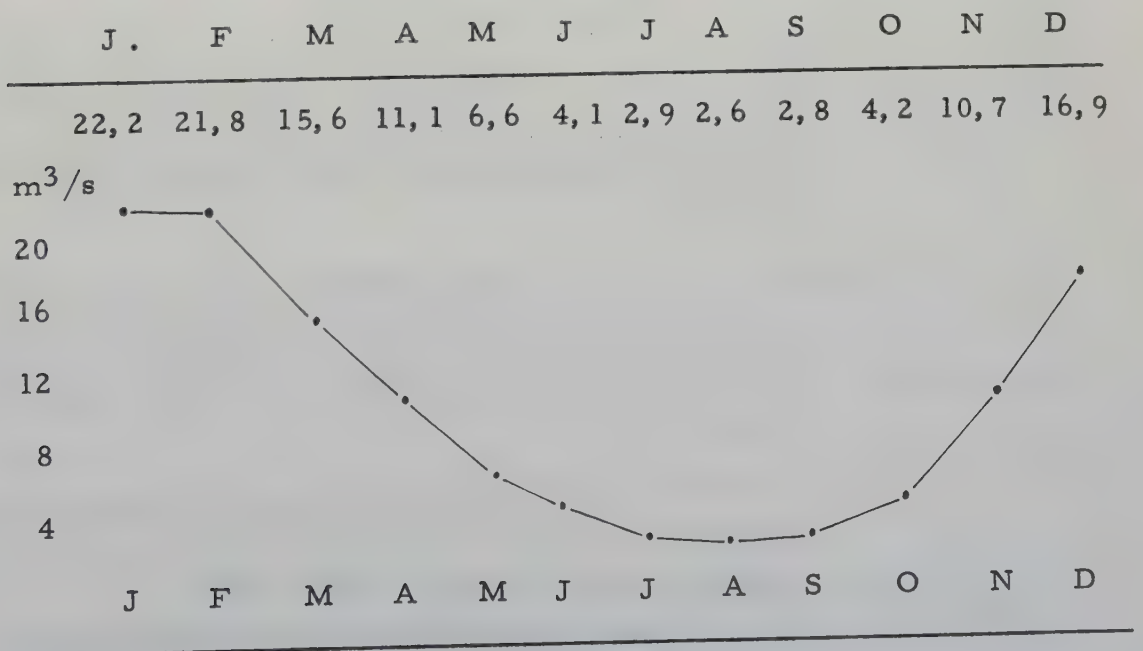
Période 1936-1965 :

Débits moyens } $10,2 \text{ m}^3/\text{s}$
à Guerlédan } $16,5 \text{ l/s/km}^2$

Lame d'eau équivalente : 514 mm.

Le débit maximum instantané connu est de : $180 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1880.

La variation des débits moyens mensuels est la suivante :



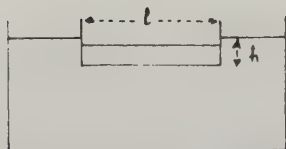
-figure 6-5-

On retrouve là le même régime atlantique que pour le Scorff.

A Polvern, la dernière écluse avant la mer, la hauteur d'eau en amont du déversoir est lue trois fois par jour par l'éclusière. Ce sont les débits calculés à partir de ces chiffres qui furent utilisés au chapitre 5.

La formule de Bazin permet de tarer ce déversoir :

$$Q = m \left(l - \frac{2h}{10} \right) \cdot h \sqrt{2gh}$$



Q en litres par seconde.

$$\text{Avec : } m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h} \right) \left[1 + 0,55 \frac{h^2}{(h+p)^2} \right]$$

p = hauteur du seuil au dessus du fond amont.

h = hauteur de charge.

Les débits ainsi obtenus ne sont évidemment qu'approximatifs. Ils permettent cependant de préciser les quantités maximales d'eau douce amenées par le Blavet dans l'estuaire.

Par exemple, le 25/2/66, une crue du Blavet porte le débit à 101 m³/s à Guerlédan (le même jour la crue du Scorff est de 52,5 m³/s). Les hauteurs d'eaux à Polvern permettent d'estimer à 239 m³/s le débit maximal déversé vers la mer.

Une très grossière approximation permet donc d'évaluer à 350 m³/s le débit à Polvern correspondant à la crue centenaire de 180 m³/s à Guerlédan.

6 - 2 - Le contexte physique du bassin versant

6 - 2 - 1. La Géomorphologie

C'est l'histoire géologique qui conditionne le reli

de ces bassins versants.

Les glaciations quaternaires par l'abaissement relatif du niveau de la mer ont amené les cours d'eau à surcreuser leur lit pour retrouver un profil d'équilibre.

L'allure générale est donc celle d'un plateau incliné vers le Sud, de 300 mètres aux Monts d'Arée à 30 m en région côtière et sillonné de vallées étroites et encaissées.

6 - 2 - 2. Géologie et Pédologie

La carte géologique présentée au premier chapitre montre la complexité du sous-sol de cette région. En fait, du point de vue de la circulation de l'eau, on peut se contenter de classer les roches en deux groupes :

- les granites et "granulites"
(granites à deux micas)
- les schistes
(schistes Briovériens et Carbonifères).

COPPENET et RAMPON (1967) ont montré que les sols de ces bassins versants suivaient aussi cette classification : il y a des sols granitiques et des sols schisteux. Les profondeurs meubles sont dans les deux cas du même ordre de grandeur : 0,60 m en situation de sommet et 1,20m en bas de pente. La couverture est donc très mince et la capacité de rétention le sera également.

L'étude des deux auteurs ci-dessus fournit des renseignements sur la texture de ces sols :

- sablo limoneux à limoneux pour les sols granitiques,
- texture allant du limon au limon argileux pour les sols schisteux.

On peut donc s'attendre à un bon drainage, et par conséquent à un lessivage vertical des argiles, important. Il n'en est rien ; l'indice d'entraînement moyen est de 1,14 pour les sols granitiques, de 1,13 pour les sols schisteux.

De plus, la circulation souterraine de l'eau est importante. Une étude de structurologie du bassin versant du Blavet (RAMPON, 1969) fait induire à l'auteur, sous la zone aquifère du domaine pédologique, une circulation du type fissural, intense en région granitique, mais également sensible en région schisteuse.

La tectonique générale du massif armoricain, évoquée au chapitre 1er, a donc des conséquences à petite échelle qui influent considérablement sur le régime hydraulique du Blavet et du Scorff.

6 - 2 - 3. Individualité des deux bassins versants

Le relief accusé, la faible couverture de sols, le drainage excellent et la circulation fissurale expliquent donc bien le fait qu'après chaque pluie, les eaux du Blavet et du Scorff montent subitement.

Mais elles montent aussi simultanément et la circulation souterraine, liée à la tectonique régionale, en fournit l'explication, explication qui met en cause (RAMPON, 1969) l'individualité des divers bassins versants.

La relation immédiate précipitation - débit, a évidemment des conséquences directes sur la circulation estuarienne. De plus, en replaçant le phénomène de la chute de pluie dans son contexte météorologique, il va apparaître que débits d'eaux douces et circulation littorale, donc apport d'eau de mer à l'estuaire, ne sont pas des phénomènes indépendants.

6 - 3. Synthèse climatologique.

Le contexte météorologique le plus général est marqué par l'existence de la chaîne de dépressions Nord-Atlantique citée au chapitre 3.

Ces dépressions qui traversent le plus souvent le Nord de la France ou le Sud de l'Angleterre, sont accompagnées, au Sud, de passages de front, causes des précipitations dans la région côtière.

Les débits des rivières côtières vont donc immédiatement croître.

De plus, le passage de ces dépressions est accompagné de vents de secteur Ouest. En mer, il y aura donc naissance de courants de dérive portant en gros à l'Est.

On a vu l'influence de ces courants de dérive sur la circulation de l'estuaire.

La figure 6-6 montre un exemple typique des relations frappantes entre :

- la variation de la pression atmosphérique (passage des dépressions)
- les débits des rivières,
- la direction des vents,
- la nature de la circulation littorale ; courants de dérive et courants R . (Mesures de la Pointe du Talud du 24/4/68 au 12/5/68).

Le mécanisme est le suivant :

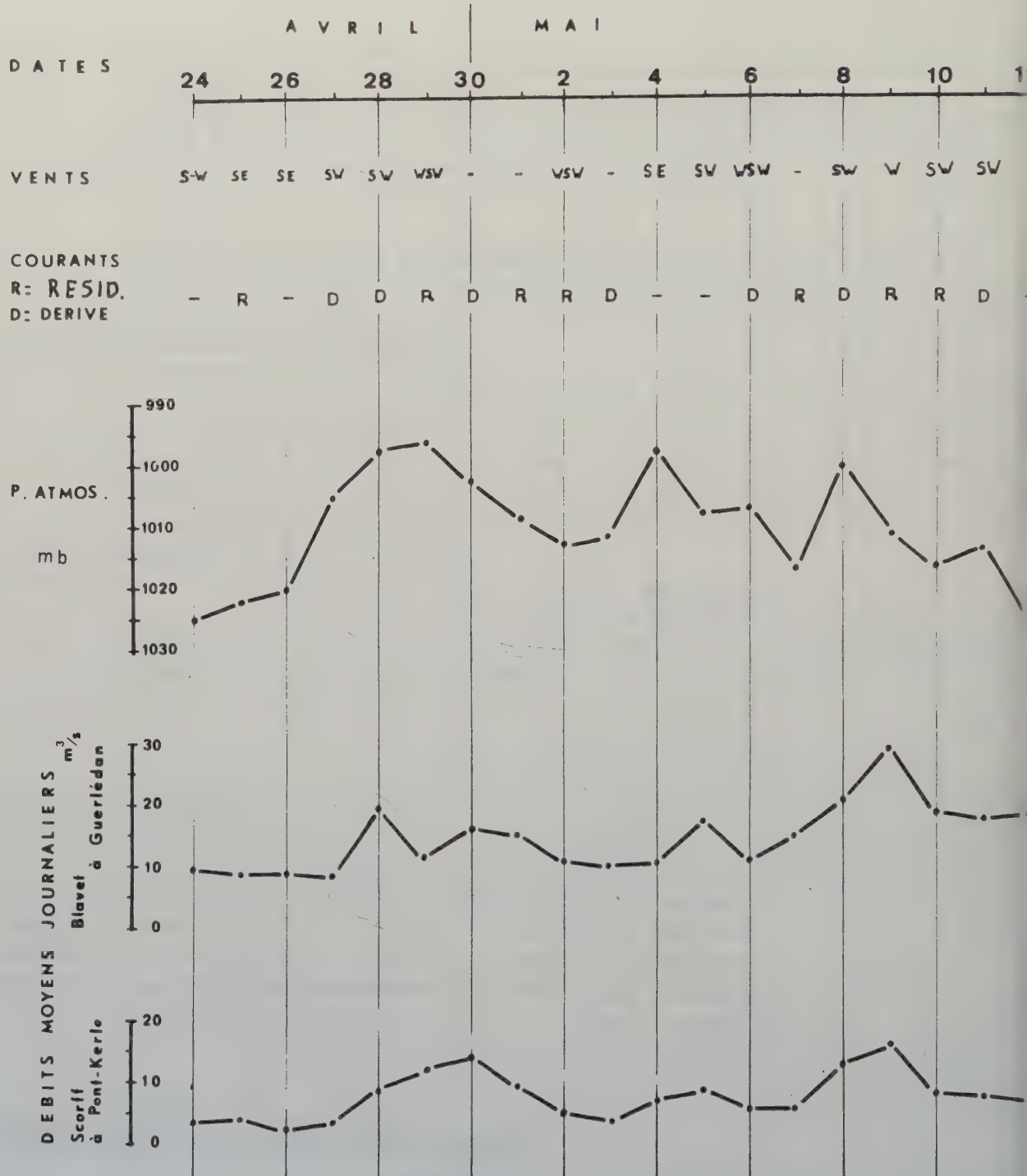
1ère Phase :

Météorologie -----	Hydrologie marine -----	Hydr. continentale -----
Passage d'une dépression sur le Sud de l'Angleterre accompagnée de vents de secteur Ouest.	Marée barométrique. Dans le système "courants de dérive, courants résiduels" créé par les vents, les courants de dérive dominant.	Précipitations, ruissellement, gonflement simultané des rivières.

Conséquences pour la circulation estuarienne :

L'équilibre masses d'eaux douces apportées par le fleuve, masses d'eaux salées apportées par les courants de marée, équilibre qui assurait l'évacuation totale du débit du fleuve, est rompu. Un pseudo-équilibre, influencé par les courants de dérive, le remplace. Seule une fraction du débit des rivières est évacuée vers la mer.

Relations Météorologie - Hydrologie Marine - Hydrologie Continentale



2ème Phase :

<u>Météorologie</u>	<u>Hydrologie Marine</u>	<u>Hydrologie continentale</u>
La pression atmosphérique remonte. Les vents se calment	Dans la circulation littorale, les courants résiduels R.dominent.	Le débit des rivières décroît.

Conséquences pour la circulation estuarienne :

L'équilibre estuarien est rompu dans l'autre sens. Les masses d'eaux douces dont l'évacuation avait été gênée par les courants de dérive, s'écoulaient vers la mer en accélérant le jusant par une sorte de courant de pente.

Ainsi, le 9 Mars 1967 (voir annexe tableau V p.23) une petite dépression se formait sur l'Atlantique. Elle atteignait, le 10, les côtes de Bretagne, accompagnée de précipitations et de forts coups de vent (106 km/h à Ouessant). Ce même jour, le Blavet gonflait, atteignant son maximum mensuel (37,6 m³ à Guerlédan).

La pression atmosphérique remontait à partir du 12 ; les vents, tout en restant de secteur Ouest, s'affaiblissaient. Les débits du Blavet tombaient à 28 m³/s le 15.

Le 15, une mesure de courants de 25 heures, effectuée à 1,50m du fond en Fosse du Talud, décelait un courant résiduel, dirigé vers l'Ouest, très net et suffisamment fort pour dominer le flot. (voir par.2.3.2.2.)

De plus, des mesures de salinité en surface et en profondeur, décelait la présence d'un fleuve d'eau à 31,6 o/oo au centre, au milieu des eaux océaniques à salinité normale.

On assistait donc là au déroulement de la 2ème phase citée plus haut.

6 - 4. Conclusion

C'est la relation étroite :

débits d'eaux douces - situation météorologique - circulation littorale,

qui conditionne, en fait, toute la circulation estuarienne étudiée au chapitre précédent.

Un estuaire s'intègre donc absolument dans un "environnement", à la fois terrestre et maritime où les données climatologiques restent les facteurs prépondérants.

CHAPITRE VII

SEDIMENTOLOGIE

Introduction.

Les régions sédimentologiques.

Les constituants de la vase.

La texture.

Conclusion.

7 - 1. Introduction

Les phénomènes observés jusqu'à présent concernaient principalement les interactions entre l'air et l'eau.

L'étude des interactions entre la terre et l'eau nécessite, elle, une entrée en matière qui consiste en l'étude du matériau transporté, déposé, retransporté, c'est-à-dire, le sédiment.

Les caractéristiques du sédiment qui seront étudiées ici, sont celles qui mettent le mieux en lumière les problèmes de transport. Les sédiments les plus fins seront donc étudiés avec plus d'attention que les sédiments grossiers.

7 - 2. Les régions sédimentologiques

On peut nettement distinguer une région sableuse et une région vaseuse :

7-2-1. La région sableuse

Sa limite Nord est fixée par le Goulet de Port-Louis (voir carte 7-1).

Tous les abords de la Rade de Lorient sont tapissés de sables très hétérogènes où se mêlent les grains de quartz picotés, recouverts de pellicule d'oxyde de fer, grains non usés et émoussés luisants.

Les minéraux lourds très abondants, ont été souvent étudiés dans ces formations (S. DURAND, 1960).

Les formations sableuses tapissent toute la zone comprise entre Groix et la côte et sont recouvertes par endroit, par 25 mètres d'eau.

Elles seront étudiées uniquement sous l'angle du matériau transporté :

- dans les passes de Lorient, pour déterminer l'apport de sable marin dans la sédimentation de la rade,

- sur les plages du Pouldu à Etel pour mettre en évidence une éventuelle dérive littorale.

Dans ces formations sableuses, il y a une exception : la Fosse du Talud (voir carte 7-1) qui est vaseuse.

La vase de cette Fosse et les sables qui l'entourent immédiatement seront étudiés tout spécialement.

7-2-2. La région vaseuse

Elle peut se subdiviser en trois : (v. carte 7-1)

- la Rade :

C'est la région la plus modifiée par l'homme : construction de quais, comblement de vasières, creusement de souilles. La sédimentation y est presque totalement vaseuse, dans les chenaux notamment. Il n'y avait qu'une seule exception, le chenal Aval du Ter qui était entièrement sableux avant la fermeture du barrage de Kermel. Il s'est envasé depuis.

Des bancs rocheux : Banc du Turc, Banc du Kerso, sont souvent accompagnés de formations aréniques bordières et le chenal Est de l'île Saint-Michel est un mélange de sables et de vases.

- la zone pré-estuarienne :

Elle est comprise entre Pen Mané et le Pont du Bonhomme ; les vasières y sont très étendues et on peut distinguer la succession classique.

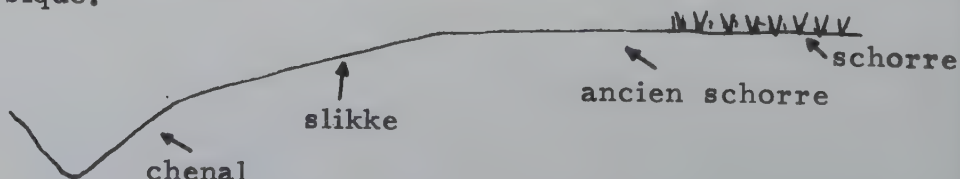
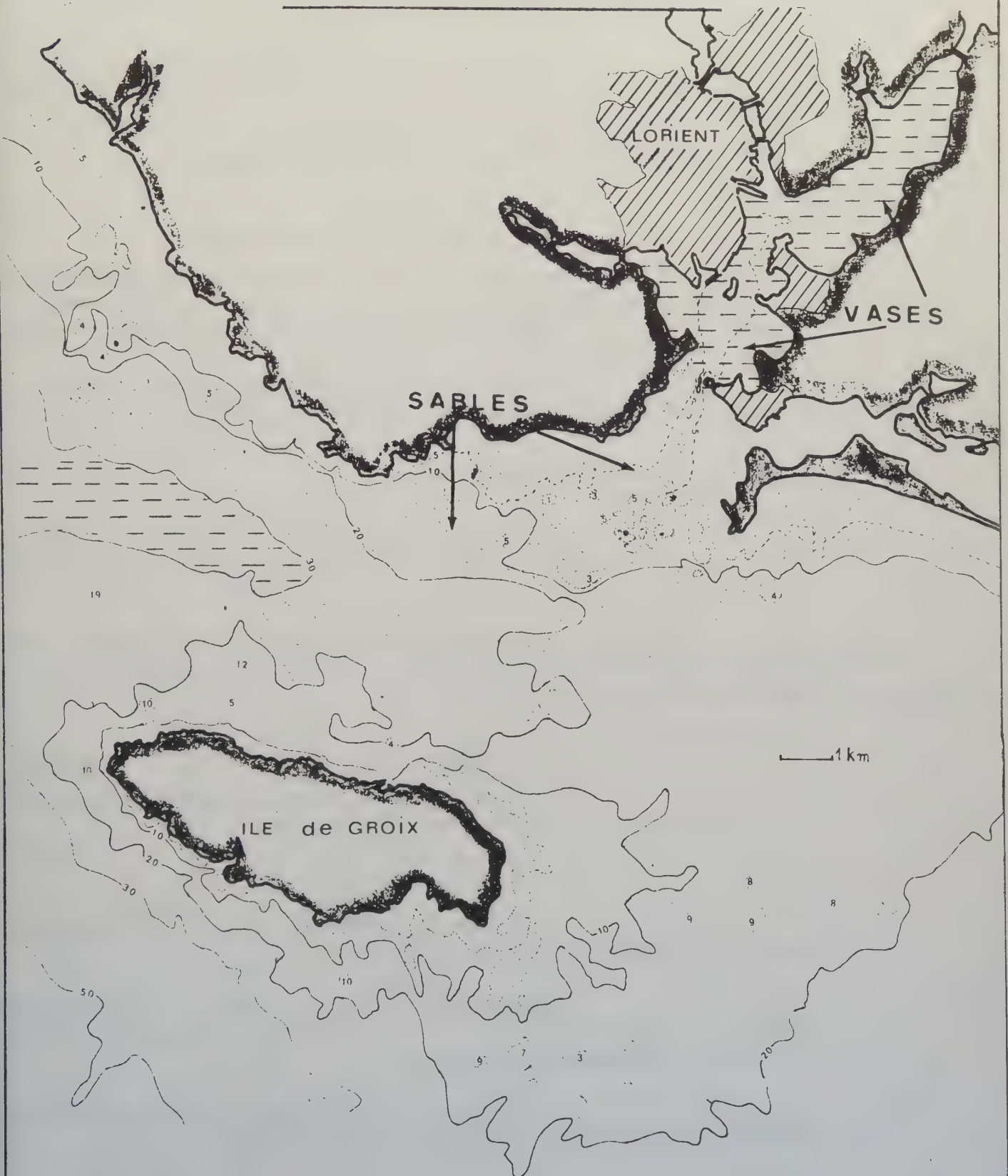


FIG 7.1

Carte des Régions Sédimentologiques



Partout, la sédimentation est vaseuse mais il faut souligner que la portion aval du chenal est cependant tapissée de sédiments assez grossiers ; des bancs d'huîtres, une vase très sableuse, constituent en effet, des fonds plus durs.

- la zone estuarienne :
(en amont du Pont du Bonhomme)

Les schorres et les slikkes sont ici beaucoup plus réduits du fait de l'énormité de la vallée, mais le chenal n'est pas toujours vaseux. De nombreux bancs de sables l'encombrent souvent.

On trouve alors par rapport à ce banc central, deux chenaux latéraux vaseux, de profondeurs inégales.

7 - 3 . Les constituants de la vase

Le phénomène estuarien, du point de vue sédimentaire, semble donc lié à la présence de ce sédiment particulier qu'on appelle la vase.

Cette dénomination recouvre des sédiments assez différents dans le détail mais qui sont formés d'un mélange de trois constituants essentiels :

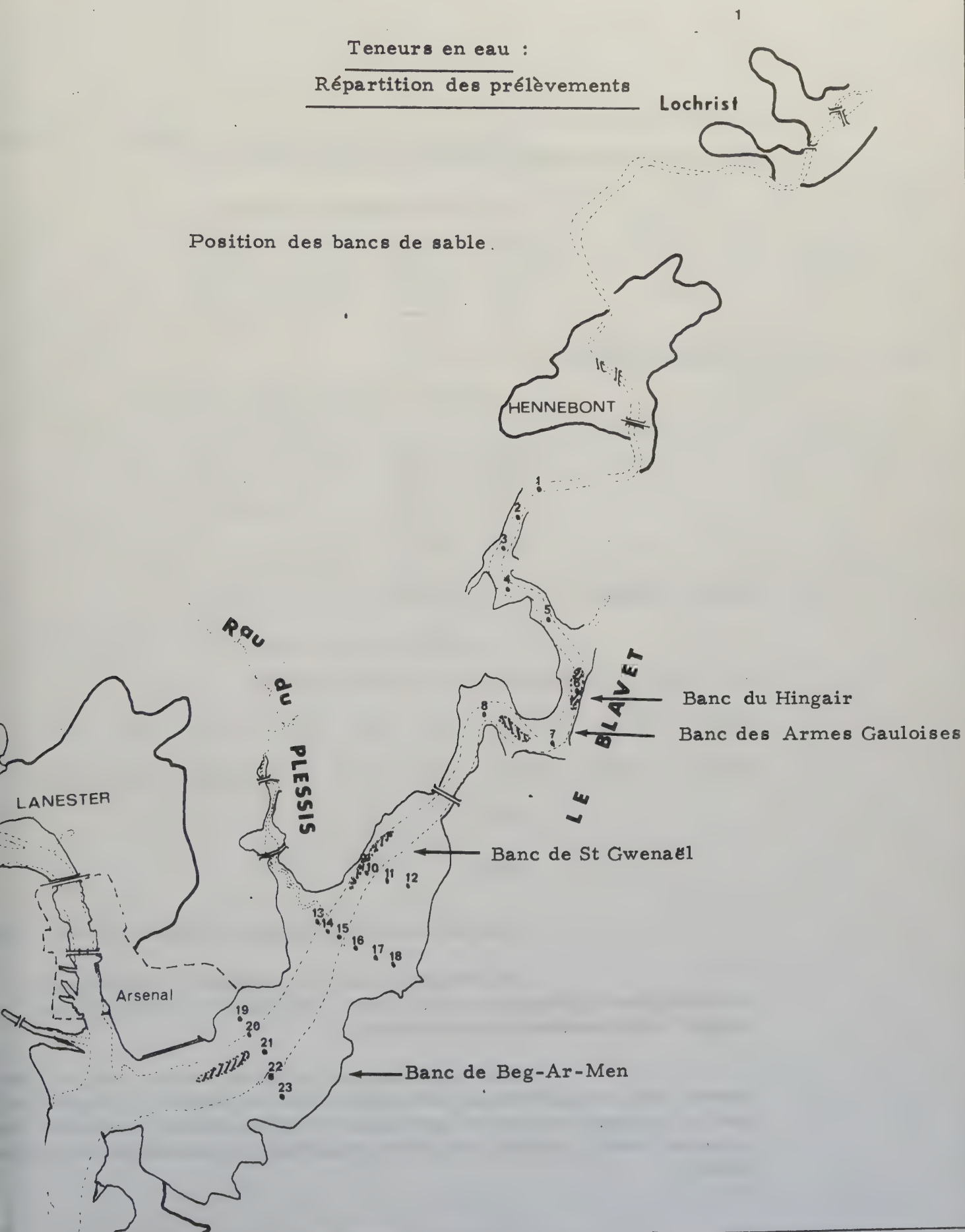
- de l'eau,
- de la matière organique,
- des minéraux, en général de petite dimension (inférieure à 62 microns).

7 - 3 - 1, L'eau

La détermination de la teneur en eau est un paramètre très utilisé en mécanique des sols.

Pratiquement, mutatis mutandis, un sédiment sera d'autant plus apte à la remise en suspension ou en saltation que sa teneur en eau sera plus élevée.

Une vingtaine d'échantillons ont donc été ainsi recueillis à marée haute et analysés. (voir carte 7-2)



On peut les grouper en trois catégories. (les pourcentages sont exprimés relativement en poids sec).

- Les sédiments de la slikke :

n° 9 : 100 %
 n° 11 : 118 %
 n° 21 : 113 %
 n° 22 : 111 %

Valeur moyenne : 110 %.

- les sédiments de l'ancien schorre :

n° 11 : 118 %
 n° 12 : 137 %
 n° 17 : 124 %
 n° 18 : 185 %
 n° 19 : 151 %

Valeur moyenne : 143 %

- Les sédiments des chenaux :

De l'aval vers l'amont, et de gauche à droite :

N° 20	N° 15	N° 16	N° 10	N° 8	N° 7	N° 6	N° 5	N° 4
68 %	100 %	106 %	93 %	34 %	180 %	40 %	242 %	79 %
		N° 3		N° 2				
		142 %		206 %.				

Dans le chenal du Ruisseau du Plessis N° 13 : 300

Les teneurs en eau des sédiments du schorre semblent donc légèrement supérieures à celles de la slikke, et ce, malgré une émigration plus prolongée.

Quant aux chenaux, les valeurs sont, soit les plus fortes, soit les plus faibles et aucune variation régulière, d'amont en aval, n'apparaît avec un si petit nombre d'échantillons. Toutefois, les relations avec la teneur en matière organique ne paraissent pas impossibles.

7 - 3 - 2. La matière organique

C'est le deuxième constituant important.

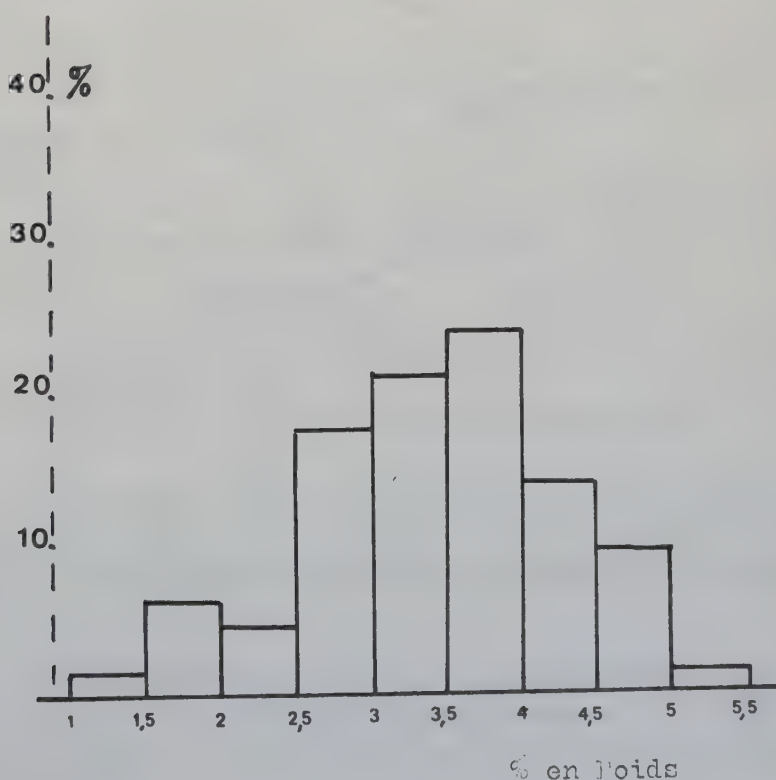
Sa teneur est difficile à évaluer quantitativement. On sait bien doser le carbone et l'azote organique (voir annexe), mais les coefficients reliant ces résultats à la teneur globale en matière organique varient suivant l'état de décomposition de cette dernière. Ce sont donc les pourcentages de C et de N organique qui seront d'abord exprimées ici.

7 - 3 - 2-1. Carbone et Azote organique des lutites

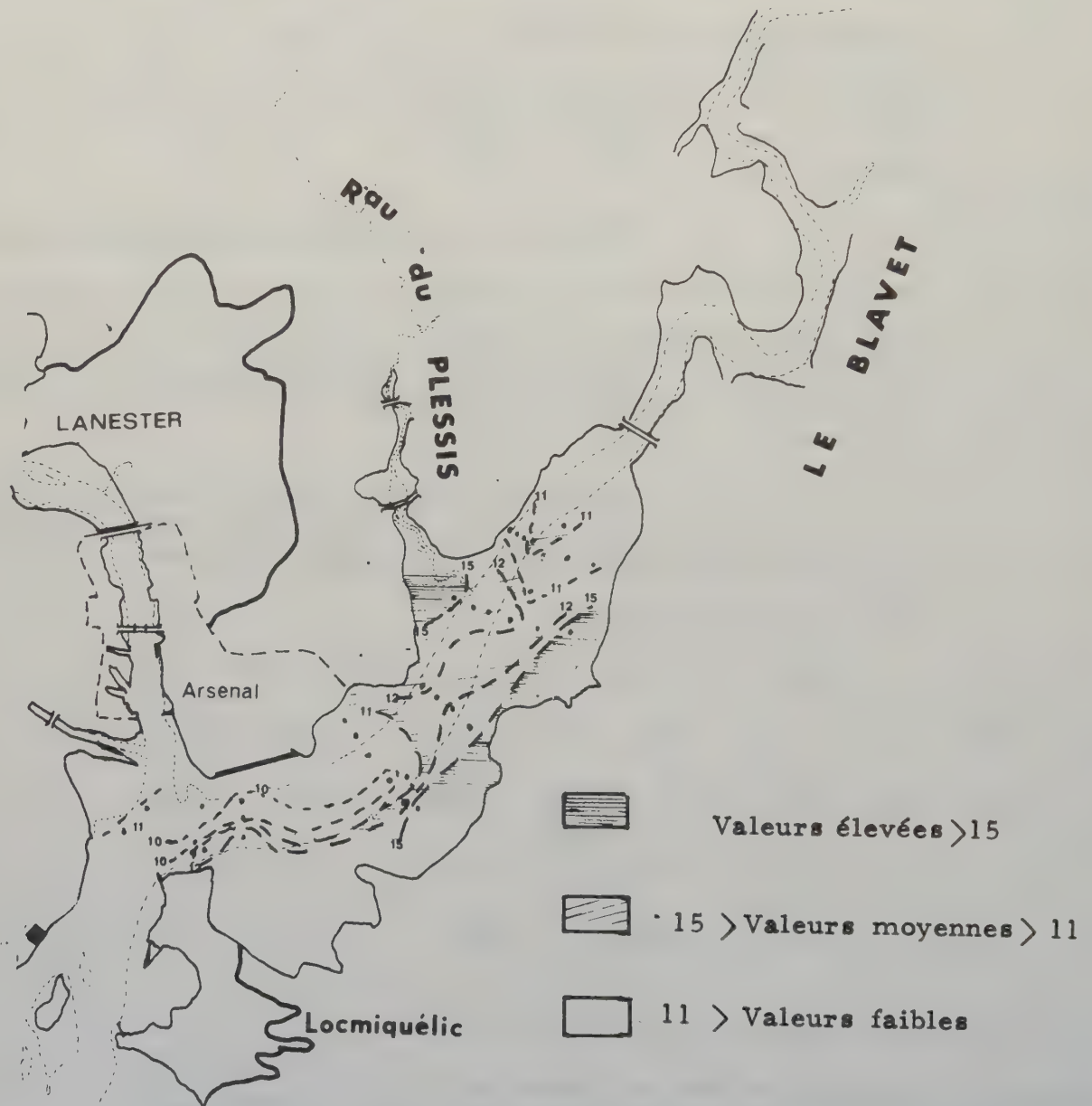
63 échantillons de vase, principalement dans l'estuaire ont été étudiés et, le carbone et l'azote dosés dans la fraction granulométrique la plus fine et la plus abondante, les lutites (diamètre inférieur à 62 microns). Les résultats sont décrits dans le tableau cité en annexe.

L'ensemble de ces données peut tout d'abord, être visualisé dans les histogrammes suivants, bien que la répartition géographique des échantillons (voir carte 7-3) ne soit nullement statistique.

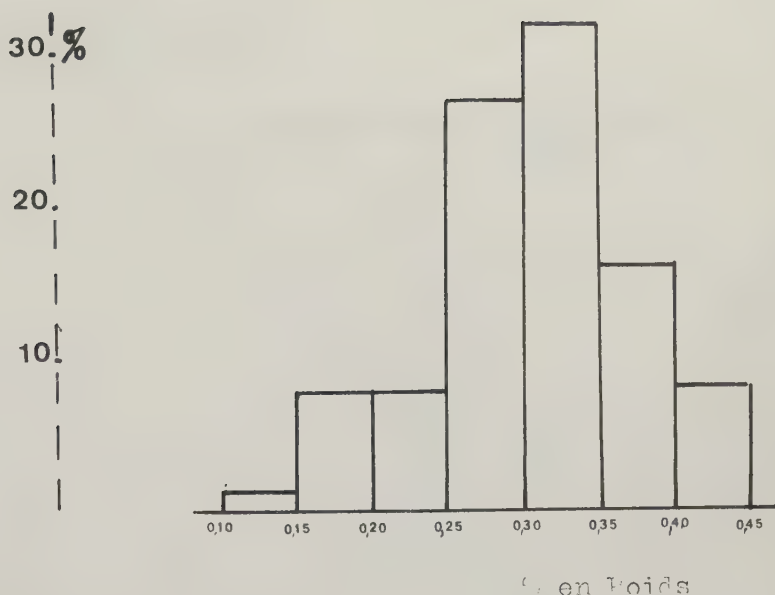
Répartition des teneurs
en Carbone Organique



Variation géographique du Rapport C/N



Répartition des teneurs
en Azote organique



- Classe dominante de l'azote : 0,30 - 0,35 %
- Classe dominante du carbone : 3,5 - 4 %.

mais la dispersion est très différente pour ces deux données : 60% des mesures d'azote sont comprises entre 0,25 et 0,35% (2 classes) alors que pour le carbone, l'histogramme est beaucoup plus étalé.

Les rapports $\frac{C}{N}$ peuvent être extraits et figurés

par un nuage de points, s'allongeant approximativement suivant une direction prédominante (voir fig.7-4). Malheureusement, la répartition non statistique des points de prélèvements ne permet pas d'aller plus loin dans l'analyse.

Il est préférable, en tenant compte de la moyenne générale des teneurs en C/N, qui est de 11,2%, de considérer la répartition géographique des valeurs (fig.7-3).

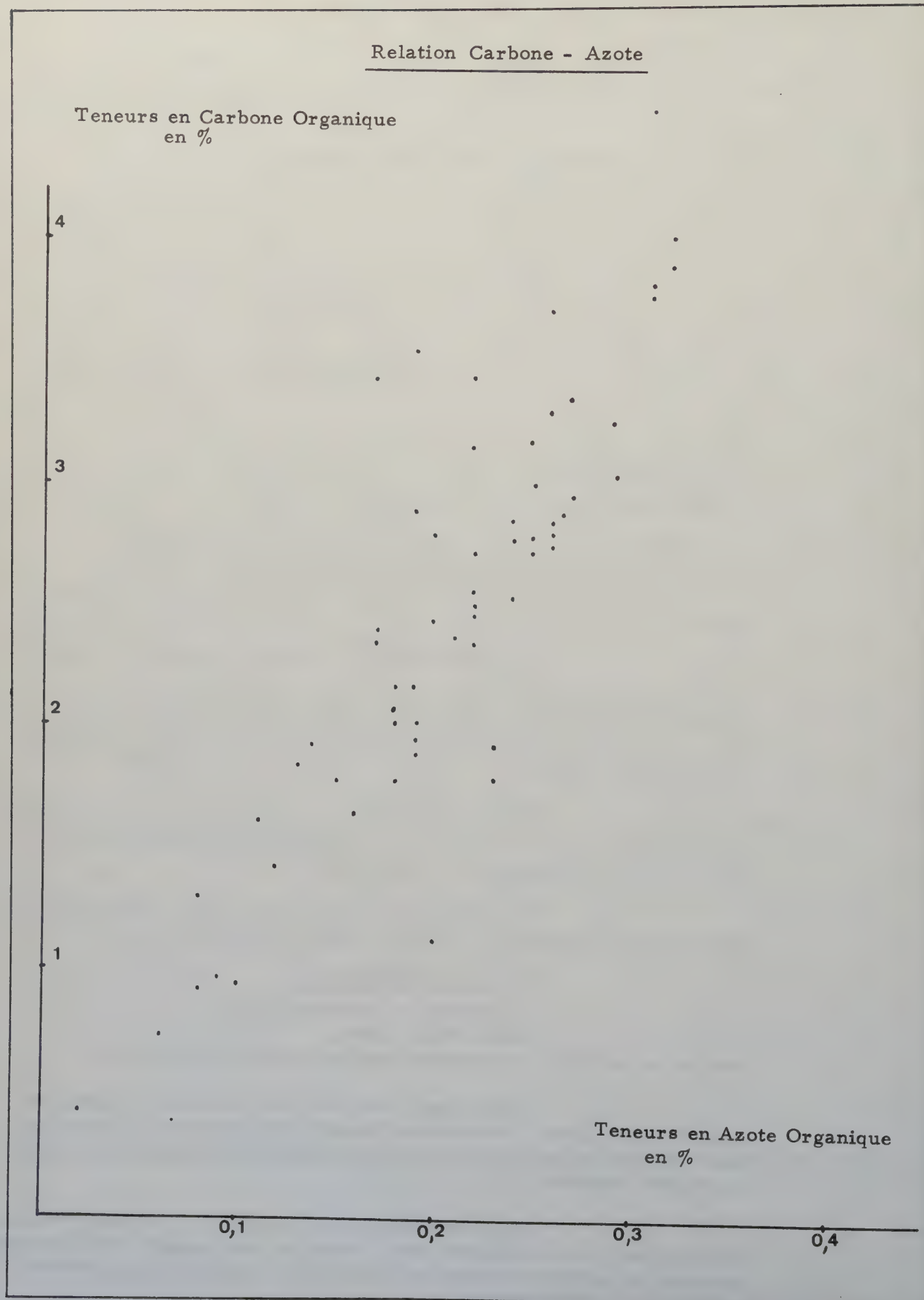
Les valeurs les plus élevées se trouvent près des embouchures de ruisseaux, sources d'apports végétaux :

- ruisseau du Plessis,
- ruisseau de Sterbouest, et
- Blavet lui-même,

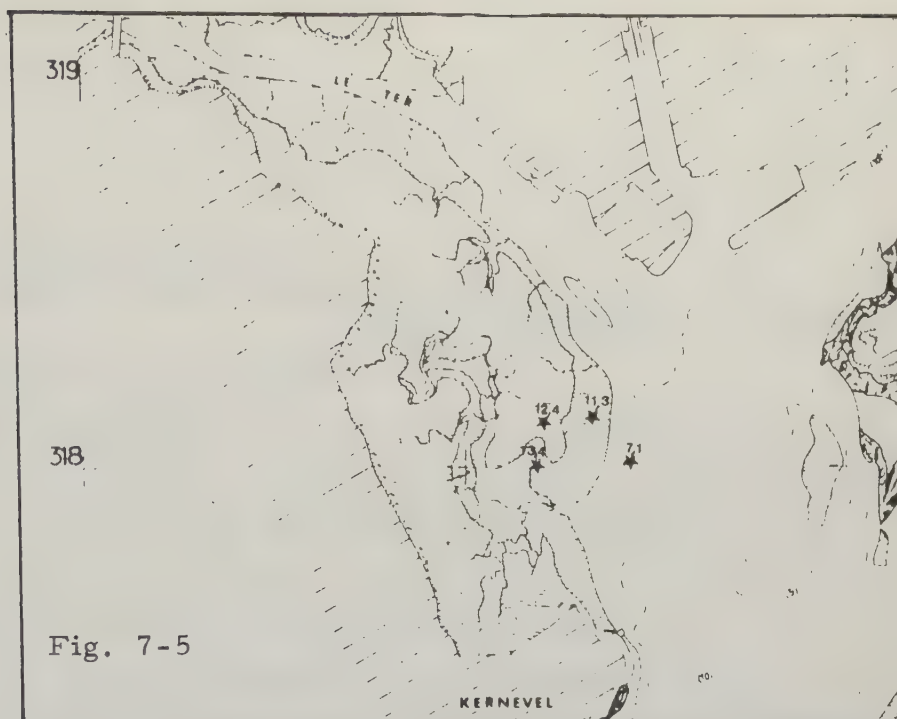
puisque les valeurs décroissent à partir du Pont du Bonhomme.

Les anciens schorres sont eux-aussi le siège de rapports C/N élevés ; les valeurs basses trouvées dans le chenal peuvent être attribuées à la turbulence produisant une saturation de l'eau en oxygène dissous.

Les différences de valeurs entre ruisseau, vasière et chenal sont bien marquées dans la vasière de Kernevel où à quelques centaines de mètres de distance les valeurs les plus élevées côtoient les valeurs les plus basses.



Carroyage
Lambert



Les embouchures de ruisseaux et les schorres sont donc des zones riches en matière organique ; ce sont aussi des zones où les teneurs en eau sont grandes (voir par.7-3-1), et l'on rejoint là les résultats de TRASK (1953) constatant une relation entre la teneur en eau et la teneur en matière organique.

7 - 3 - 2-2. Composition de la matière organique

7 - 3 - 2-2-1. Les acides fulviques et humiques

Les extractions de ces deux catégories d'acides sont plus du domaine de la pédologie que de la sédimentologie (DUCHAUFOR, DEBYSER, 1961). Cependant, elles vont permettre, dans le contexte présent, de vérifier certaines affirmations précédentes.

Six échantillons ont été étudiés :

- deux (n°79 et 81) sont situés en amont du Pont du Bonhomme,
- deux, sont des sédiments de chenaux (n°89 et 145),
- un est un échantillon de slikke (167) en aval (vasière de Kernevel) et près d'un ruisseau,
- un autre est un échantillon d'ancien schorre près du Pont du Bonhomme (n°87).

Les résultats obtenus par la méthode DUCHAUFOUT (voir annexe), sont donnés dans le tableau ci-dessous.

ESSAIS SUR LA COMPOSITION DE LA
MATIERE ORGANIQUE

Fraction inférieure à 62 microns.

Echantillon	C %	N %	Acides Fulviques %	Acides Humiques %	Cires et Rosine %
L O - D - 79	3,16	0,28	1,45	0,50	
81	4,88	0,42	1,15	1,00	
87	4,71	0,36	0,90	1,05	
89	4,79	0,36	0,80	0,90	
145	2,64	0,26	0,90	1,35	
167	3,34	0,27	1,95	1,65	1,10

- Tableau 7-6 -

Les acides fulviques semblent bien dominer près d'une embouchure de ruisseau (167) ou en amont de l'estuaire (79-81).

Les données concernant l'échantillon 87 (échantillon d'ancien schorre), très voisines de celles d'un échantillon de chena sont intéressantes. Elles montrent combien les teneurs en matière organique des sédiments superficiels sont liés aux apports actuels de matière végétales.

7 - 3 - 2 - 2-2.

Matières organiques incandescentes
et combustibles

Les courbes d'analyse thermique différentielle des échantillons (voir procédure en annexe), présentent des pics exothermiques très importants à basse température (voir courbe 1, dans figure 7-7) 300 - 390 - 460, et ce, de façon très répétitive (1 bis) - Mac Kensie (1947) avait déjà assimilé la présence de tels pics à celle de la matière organique.

Effectivement, lorsqu'on opère sous azote (courbe 2) ces pics disparaissent ; ils sont donc bien liés à une réaction d'oxydation. Mais on ne pourra avec certitude parler de matière organique que lorsqu'on aura reproduit, avec de la matière organique parfaitement identifiée et isolée, des pics identiques.

Or, une feuille de châtaignier, dans les mêmes conditions, donne des températures de combustion très différentes. (780°, courbe 3).

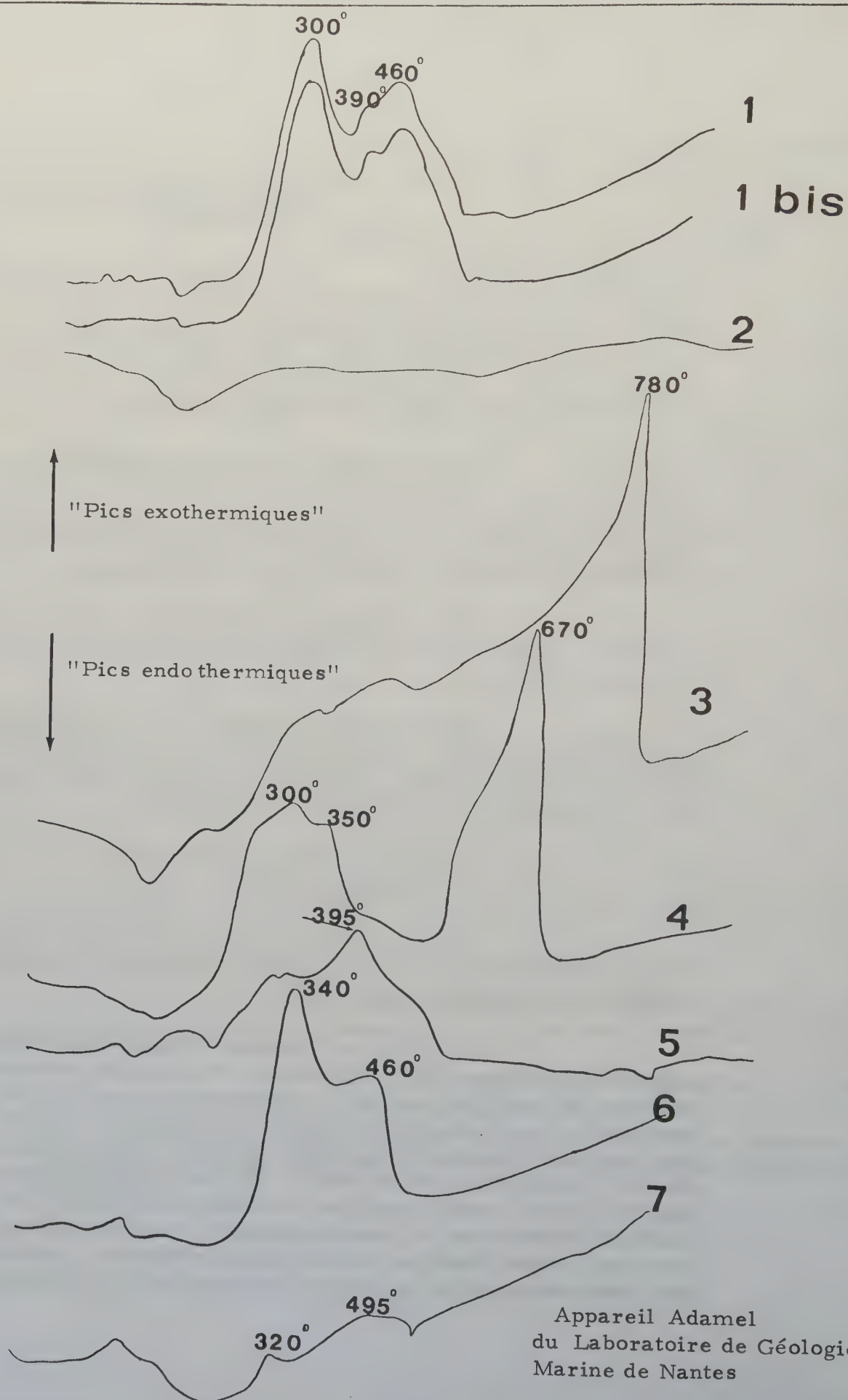
En isolant la cellulose α de cette feuille par élimination des autres constituants (méthode au mélange acide nitrique-alcool sous reflux), cette dernière montre à son tour des pics à des températures très différentes : (courbe 4)

- incandescence entre 300 et 350°,
- combustion à 670°.

Par contre, les substances éliminées (lignines et hémi celluloses) sont, elles, presque totalement incandescentes (courbe 5, pic exothermique à 395°).

De plus, en effectuant l'analyse thermique différentielle du mélange (20% cellulose + 80% alumine calcinée), on retrouve un profil de courbe très comparable à celui de l'échantillon considéré. Ce pic de combustion à 670° a disparu et il n'y a plus que deux pics d'incandescence à 340 et 460°. L'alumine a joué son rôle de "retardateur de flammes". On peut raisonnablement penser que c'est aussi le rôle joué par les alumino-silicates de la fraction minérale du sédiment et, par conséquent, les pics exothermiques rencontrés dans l'analyse thermique des sédiments, correspondent aux incandescences des celluloses, hémicelluloses lignines, etc ...

Courbes d'Analyse Thermique Différentielle des divers constituants
de la Matière Organique



Appareil Adamel
du Laboratoire de Géologie
Marine de Nantes

Il a été impossible de pousser plus loin cette identification ; il ne semble pas qu'un pic corresponde à l'incandescence d'une substance particulière.

Cependant, avec plus de 70 analyses thermiques différentielles sur divers échantillons et différents appareils, on peut signaler que le groupe de trois pics exothermiques est une constante (voir figure 7-8)

De plus, si le pic de température la plus élevée (entre 450 et 500°) et celui de température la plus basses (environ 300°) semblent bien correspondre à des matières organiques très stables comme la cellulose (ex. courbe 7, échantillon ne contenant que de la cellulose), le pic intermédiaire semble, lui correspondre à l'incandescence de matières organiques moins évoluées.

Ainsi, dans l'estuaire, le pic se renforce d'aval en amont (échantillon 7-5-2, carte 7-2 et graphique 7-9) et du chenal vers le schorre (10-11-12, graphique n°7-10)

7 - 3 - 2 - 2-3.

Liaisons matière organique -
matière minérale .

Le lessivage du même sédiment n°81 au pyrophosphate va briser certains complexes et chélates du fer avec les acides aminés et les argiles.

De fait, une analyse thermique différentielle qualitative (graphique n°7-11, courbe n°1), montre l'apparition d'un pic endothermique à 750°, jusque là masqué et ne pouvant appartenir qu'à des argiles (mélange kaolinite, illite ; l'analyse aux rayons X précise la présence de ces deux minéraux dans le sédiment). Sous azote (courbe 2), le pic persiste et l'on note, de plus, une large inflexion endothermique de 150 à 200°, caractéristique des réactions de deshydratation de limonites mal cristallisées ; ces réactions étaient jusqu'ici passées inaperçues ; l'extraction au pyrophosphate entraîne d'ailleurs un certain nombre de particules extrêmement fines que l'on peut concentrer par ultra-centrifugation et que l'analyse aux rayons X révèle être uniquement un mélange de kaolinite et d'illite.

FIG 7.8

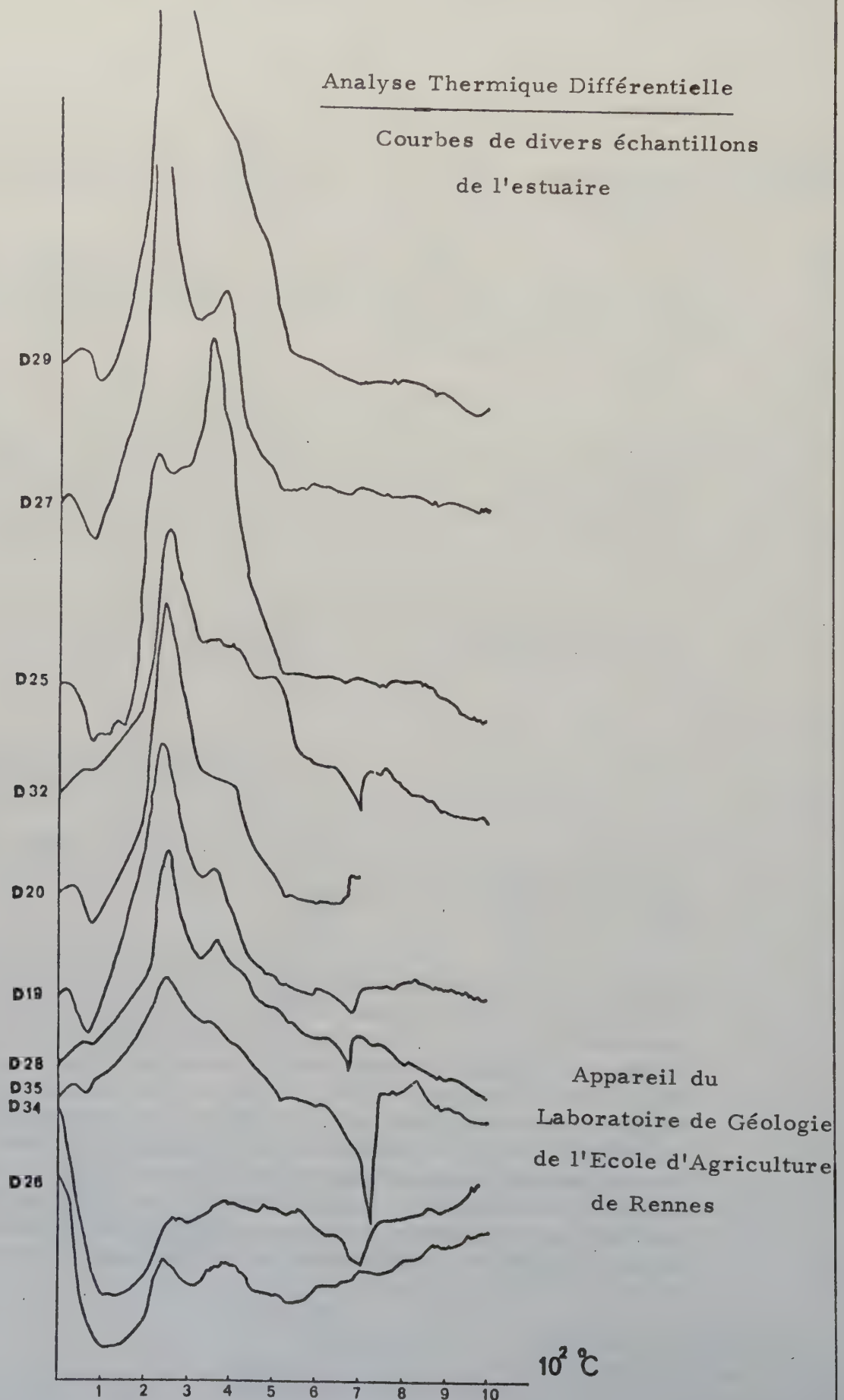


Fig. 7-9

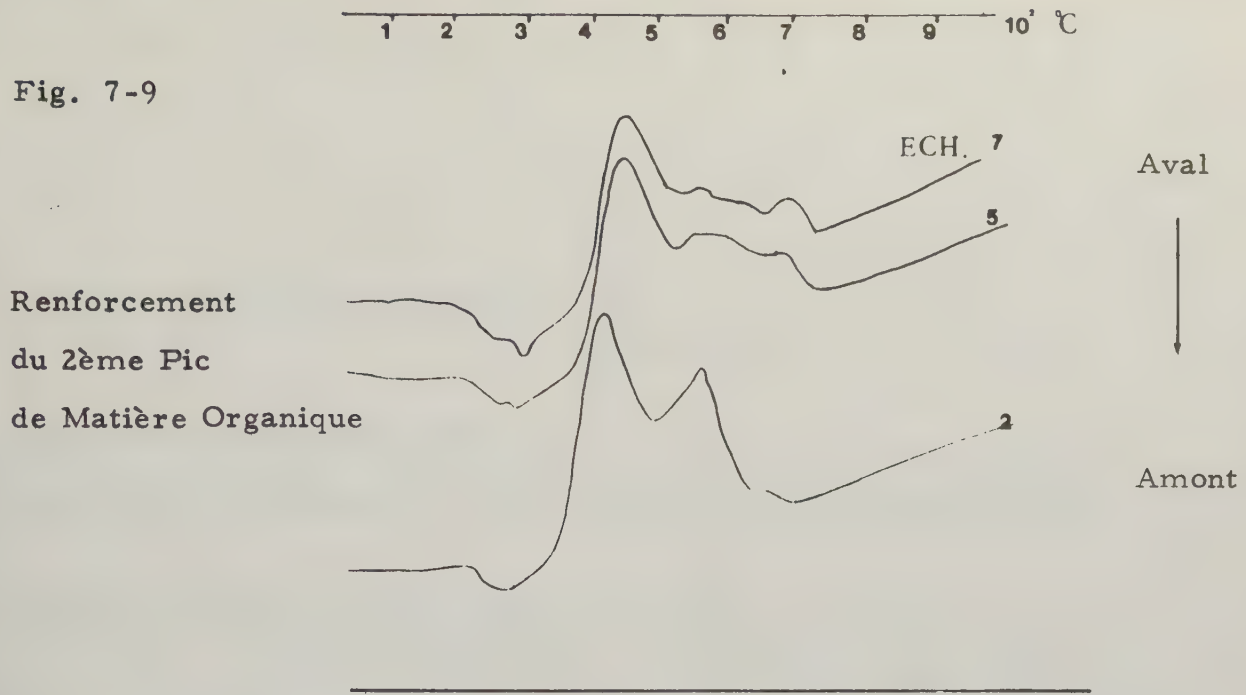


Fig.7-10

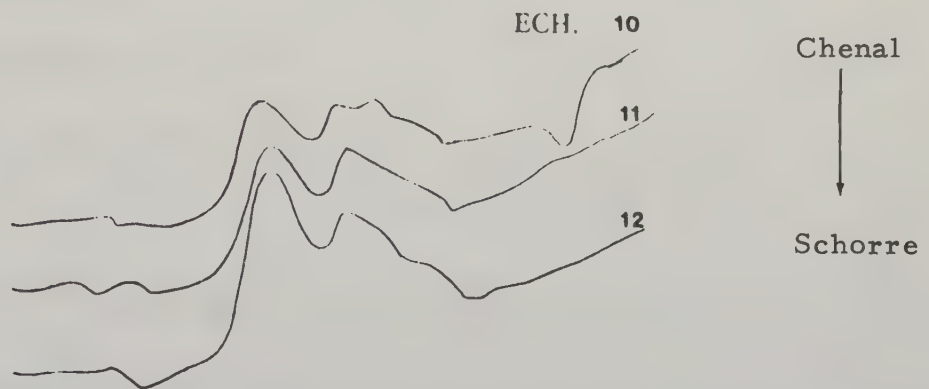
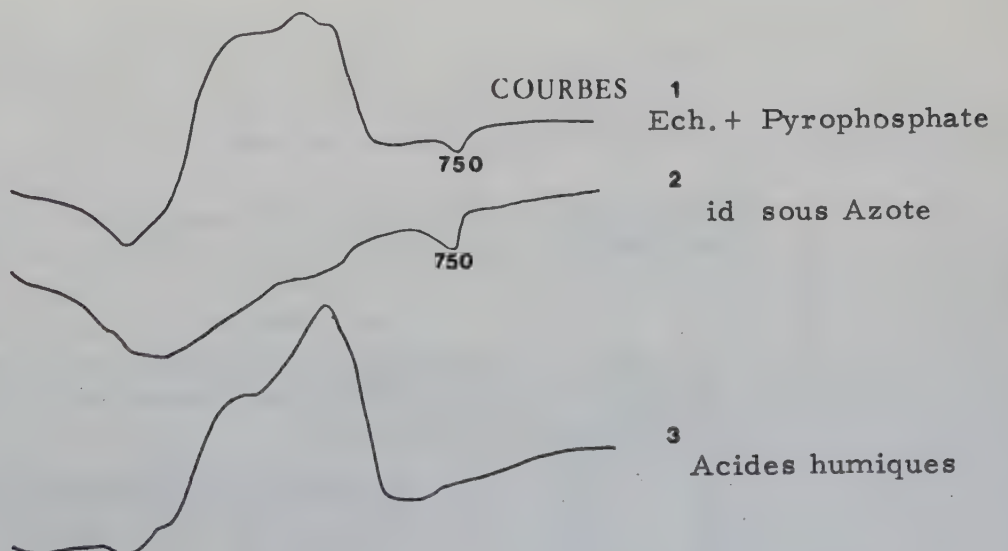


Fig.7-11

Liaisons Matière Organique - Matière minérale



Or, le pyrophosphate est considéré comme un "extracteur" d'acides humiques.

On peut donc reprécipiter ces acides et en effectuer l'analyse thermique différentielle (courbe 3) ; l'effet exothermique enregistré est bien celui correspondant à la combustion d'une matière organique.

On retrouve donc, ici, les liaisons fer-argiles-humus, bien connues des pédologues.

7 - 3 - 3. La fraction minérale de la vase.-

7 - 3 - 3-1. La description minéralogique.-

Elle fut effectuée concurremment par analyse diffractométrique aux rayons X et par étude microscopique sur six échantillons type.

Le tableau 7-12 résume la description générale des minéraux contenus dans ces vases.

Il appelle certains commentaires pour chaque catégorie de minéraux décrits.

Quartz.- Ce sont les minéraux de petite taille les plus abondants. Ils sont anguleux, non usés, blancs ; leur origine détritique est donc certaine.

Des quartz émoussés luisants n'ont été rencontrés que près de Port-Louis et ne semblent pas dépasser au Nord la latitude de l'échantillon D.34 (niveau de l'île St-Michel). Ils sont toujours peu abondants.

Feldspaths.- Beaucoup moins abondants que les quartz, ce sont uniquement des plagioclases dans les sédiments 2 et 28.

Les feldspaths alcalins sont présents dans tous les autres échantillons. Les échantillons 2 et 28 sont des échantillons de chenal et d'ancien schorre et les feldspaths alcalins sont particulièrement fragiles.

En général, les plagioclases dominent.

Analyse Minéralogique aux Rayons X d'échantillons de Vase de l'estuaire

Echantillons No	2	28	35	87	89	167
Quartz	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Feldspaths	Alcalins	-	++	++	++	++
	Plagioclases	+++	++	+	+	++
Phyllites	Mica Illite	+++	+++	+++	+++	+++
	Chlorites et/ou Kaolinites	++	++	+++	++	++
Minéraux de roches éruptives	Biotite	+	+	+	+	+
	Hornblende	-	+	++	++	+
	Magnétite Ilménite	+	+	+	+	-
	Glaucophane	+++	++	++	++	++
Minéraux de Métamorphisme	Chloritoïde	+++	+++	-	+	-
	Staurotide	-	++	++	++	+
	Grenat	+	+	+	-	+
	Disthène	-	+	-	++	-
	Sillimanite	+	+	-	+	+
	Tourmaline	-	-	+	-	-

++++ dominant
 ++++ abondant
 +++ courant

- Tableau 7.12 -

++ présent
 + traces
 - absent

Phyllites. - Les plus marquants sont évidemment les micas. La caractéristique essentielle des vases de l'estuaire est leur extraordinaire abondance en muscovite ; la biotite est toujours rare.

La présence de ces micas est évidemment très sensible dans la fraction sableuse (1mm à 62 microns) du sédiment où elle est parfois prédominante.

Ainsi, pour l'échantillon 28, le tableau ci-dessous marque bien la place prépondérante qu'ils prennent dans certaines classes dimensionnelles.

Dimension 1,48 m	Quartz + débris calcaires	
	% en nombre	% en poids ++
1,09	6 %	0,4 %
0,75	25 %	3,2 %
0,51	75 %	26,1 %
0,36	75 %	33,6 %
0,24	97 %	89 %

++ d'après les tables de BERTHOIS (1967)

Ces minéraux ont une faculté de transport très supérieure à celle des quartz et cela, d'autant plus que leur densité est souvent peu conforme à celle du minéral frais.

Ainsi, toujours dans l'échantillon 28, pour les dimensions comprises entre 0,24 et 0,36mm, un triage à la liqueur de Thoulet, ajustée à la densité $\sigma = 2,705$ donne les résultats suivants, en nombre :

4,3 % plus denses
95,7 % plus légers.

Les micas blancs, eux-mêmes, sont donc très altérés.

La chlorite, placée dans les phyllites, peut aussi être classée dans les minéraux d'altération. Sans être abondante, elle n'est pas rare et se présente en paillettes de forme elliptique, bien développées.

Les minéraux des roches éruptives

La hornblende est souvent altérée, la biotite rare, Magnétite et Ilménite sont souvent bien représentées.

En gros, les minéraux des roches éruptives forment un cortège assez peu abondant, les minéraux de métamorphisme étant beaucoup mieux représentés.

Les minéraux des roches métamorphiques

C'est le glaucophane qui peut paraître le plus intéressant. A vrai dire, le glaucophane n'est pas spécifique de roches métamorphiques et est vraisemblablement ubiquiste.

Sa présence à Groix dans les micaschistes a souvent fait considérer sa découverte dans les sables littoraux comme l'indice d'apports sédimentaires par la mer. Mais le bassin versant du Blavet comporte des affleurements de granite à glaucophane (Rampon 1970) ; il faut donc bien se garder de considérer ce minéral comme un excellent marqueur.

Le minéral de métamorphisme le plus abondant est le chloritoïde, minéral particulièrement stable ; viennent ensuite les staurotide, grenat, disthène, sillimanite, quelquefois la tourmaline.

Les minéraux des argiles

Le tableau 7-13 donne un aperçu de la répartition des argiles dans la fraction fine de six échantillons.

La chlorite et la pyrophyllite ont été placées dans ce tableau.

A R G I L L E S

Analyse Diffractométrique. (L.G.M.N.)

Echantillons No	2	28	35	87	89	167
Illite	---	++++	++++	++	+	+
Chlorite	---	+	+	---	---	++
Kaolinite	++++	++	++	++	++	+
Montmorillonite	---	---	---	---	---	---
Pyrophyllite	++	+	+	+	+++	---

La présence de cette pyrophyllite est constante ainsi que celle de la kaolinite qui est nettement le minéral argileux le plus abondant.

L'illite est, elle, distribuée, beaucoup plus irrégulièrement. Les argiles sont mal cristallisées et ce fait est à rapprocher de la découverte de liaisons fer-argiles-matières organiques du par. 7.3.2.2.3.

Les minéraux accessoires

La gibbsite est présente dans les échantillons 87, 89 et 2. C'est un minéral très fréquent dans les bauxites et latérites ; il n'est donc pas étonnant de le retrouver à la hauteur des falaises Pliocènes de la rive gauche du Blavet.

7 - 3 - 3 - 2. Les analyses chimiques

Six échantillons ont été analysés suivant les procédés classiques de l'analyse pétrographique (voir annexe).

Le résultat se présente ainsi, sous la forme d'un tableau de répartition des oxydes principaux, obtenus après les réductions nécessitées par la présence d'eau, de sel marin et de calcaire d'origine organique (tableau 7-14).

Ces listes d'oxydes sont assez peu parlantes même si on les compare à des résultats analogues sur des vases marines ou des granites du bassin versant du Blavet.

La description minéralogique des différents échantillons devrait permettre, en principe, une interprétation sous la forme d'une composition minéralogique virtuelle.

Mais dans un sédiment, aucune norme ne relie entre elles les proportions des différents minéraux.

Les attaques chimiques ménagées sont elles-mêmes entachées de graves erreurs : influence de la proportion du minéral, de la grosseur des particules.

C'est avec toutes ces réserves que l'on peut donc présenter ici une composition minéralogique, virtuelle, d'un échantillon pris comme type.

ANALYSES CHIMIQUES

Après réduction de l'eau, du sel et du CaCO_3

Echantillons No	2	79	87	89	148	167
SiO_2	71, 17	69, 28	63, 47	64, 78	59, 63	72, 16
Al_2O_3	13, 52	13, 85	18, 16	16, 38	18, 07	12, 72
Fe_2O_3	4, 97	6, 24	6, 92	6, 45	7, 85	3, 68
Mg O	2, 62	4, 41	4, 02	4, 35	5, 88	3, 92
Ca O	1, 81	traces	1, 98	2, 50	traces	2, 25
Na_2O	1, 98	2, 30	1, 32	1, 44	4, 10	1, 79
K_2O	3, 09	3, 00	3, 22	3, 10	3, 28	2, 73
Ti O_2	0, 64	0, 69	0, 87	0, 92	0, 79	0, 72
P_2O_5	0, 17	0, 23	traces	0, 08	0, 40	traces
Mn O	0, 03	0, 00	0, 04	traces	traces	0, 03
	100, --	100, --	100, --	100, --	100, --	100, --

Analyste : Mme MARGEREL. -

Laboratoire de Géologie Marine

de Nantes

- Tableau 7.14 -

Cette répartition, très approximative, a cependant, le grand avantage de tracer une description moins abstraite de la fraction minérale de la vase.

La fraction minérale de l'échantillon 89 sera ainsi, supposée constituée uniquement des minéraux suivants :

- quartz
- muscovite
- orthose
- albite)
- anorthite) plagioclases
- biotite
- glaucophane
- ilménite
- kaolinite
- illite
- oxydes de fer ⁺ hydratés.

Une attaque préliminaire à l'acide chlorhydrique au 1/2 va permettre de grouper les oxydes en deux groupes :

- groupe des oxydes solubles
- groupe des oxydes insolubles.

La composition chimique théorique de chaque minéral d'une part, les renseignements donnés par l'analyse aux rayons X d'autre part, permettent alors de calculer approximativement la proportion de chacun des minéraux ci-dessus dans l'ensemble de la fraction minérale.

Ainsi le K_2O , insoluble, sera réparti entre l'orthose et la muscovite, les rayons X fournissant le rapport :

$$\frac{\text{orthose}}{\text{muscovite}} = \frac{1}{2}$$

Le Na_2O insoluble, restant après saturation de la muscovite servira à calculer la proportion d'albite.

Le CaO insoluble sera attribué à l'anorthite.

Le MgO insoluble, sera réparti entre la biotite et le glaucophane dont le rapport des masses est de 1 à 5.

Le pourcentage d'ilménite sera calculé d'après la proportion de TiO_2 .

L'illite et la kaolinite sont présents en quantité égale et la proportion de la kaolinite sera déterminée d'après celle de la silice soluble.

Le fer sera déterminé en poids de Fe_2O_3 soluble ; la silice insoluble non consommée, constituera alors le quartz.

On obtient de cette façon le tableau suivant :

Echantillon 89	Composition minéralogique virtuelle
Quartz	43,7 %
Orthose	5,6 %
Albite (plagioclases	9,3 %
Anorthite (20,5%	11,2 %
Muscovite	11,2 %
Biotite	4,9 %
Glaucophane	0,9 %
Ilménite	1,2 %
Kaolinite	3,6 %
Illite	~ 4,0 %
Complexes, chélates, oxydes de fer ± hydratés; en Fe_2O_3	4,3 %
Total :	100,0 %

La biotite est certainement surestimée, la hornblende étant présente : beaucoup d'attributions d'oxydes sont quelque peu arbitraires mais cette composition minéralogique met bien en évidence des faits observés par ailleurs.

Le quartz est très important, même dans la fraction fine. La muscovite qui dans la fraction grossière paraît prédominante, tend à disparaître dans les fractions les plus fines et sa proportion générale, quoique importante (11,2%) n'est cependant pas prépondérante.

Les minéraux des argiles n'atteignent pas 10% du total.

Les feldspaths sont principalement des plagioclases.

7 - 3 - 3-3. Description synthétique -----

La vase de l'estuaire et de la rade de Lorient apparaît donc comme un mélange de trois constituants : l'eau, la matière organique et la matière minérale dont les liaisons sont très étroites.

L'eau et la matière organique apparaissent très liées et cette dernière, par l'intermédiaire de divers composés du fer, forme avec les argiles des complexes qui sont une transition avec la matière minérale.

Un portrait d'une vase moyenne de l'estuaire pourrait donc se présenter ainsi, en poids de vase humide :

50% d'eau,
10% de matière organique (celluloses et dérivés),
40% de matière minérale

dont les éléments les plus importants sont :

ensemble quartz + feldspaths (25% du total),
micas (5 %)
argiles (seulement 4%).

C'est donc un sédiment essentiellement terrigène.

Son origine est cependant multiple ; il faut passer en revue les indices fournis par la description minéralogique pour tenter de la préciser.

Les minéraux les plus abondants sont les minéraux les plus stables au point de vue chimique : quartz, plagioclases, chloritoïdes, micas blancs. Ces derniers sont même altérés.

L'attribution de la chaux aux feldspaths plagioclases dans une composition minéralogique virtuelle permet d'interpréter directement le tableau d'analyses chimiques 7-1.

Deux échantillons semblent ne comporter que des feldspaths alcalins (79 et 148) ; ce sont des échantillons l'un du Blavet, l'autre du débouché du Scorff dans la rade et tous deux prélevés dans des zones d'engraissement actuel. Dans les autres échantillons, les plagioclases dominent et notamment dans la fraction fine où les feldspaths alcalins semblent en diminution.

C'est l'indice d'altération par des eaux acides donc continentales et non par des eaux marines plus alcalines qui tendent à la conservation des feldspaths alcalins.

L'apport actuel du Blavet et du Scorff en minéraux fragiles semble donc se superposer à une population minéralogique très remaniée où n'ont subsisté que les minéraux les plus résistants.

Le tableau ci-dessous confirme cette impression.

Rapports	79	2	87	89	148	167
$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	5,00	5,26	3,49	3,95	3,29	5,6
$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	0,45	0,37	0,38	0,39	0,43	0,2

Le rapport $\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ traduit la présence de

ferro-magnésiens fragiles et là encore, les échantillons 79 et 148 montrent des valeurs plus élevées.

Le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ lui, semble lié (Debyser 1961)

à la présence de quartz détritique ; les valeurs sont en général très élevées.

Deux observations sont paradoxales du moins à première vue : parmi les minéraux lourds, ce sont les minéraux de métamorphisme qui sont les mieux représentés ; or le bassin versant du Blavet est, en majorité, constitué de schistes et de roches métamorphiques. Une grande partie de la vase se serait donc formée sans grands déplacements.

Mais la proportion d'argiles est très faible, et cela coïncide assez bien avec le faible lessivage actuel des argiles du bassin versant. Par contre, cela coïncide assez mal avec la présence sur la rive gauche de l'estuaire, en falaises, de formations pliocènes très riches en glauconie, avec des poches de kaolinite et d'illite (argiles de St Sterlin et du Talhouet utilisées pour la poterie.

Ces falaises sont vives, elles ont donc été érodées et les particules les plus fines semblent avoir été transportées hors de la zone estuarienne.

Ainsi l'apport actuel des deux fleuves, apport constitué de matière organique, de complexes du fer avec des argiles et des acides humiques, de minéraux fragiles, se superpose à une population plus ancienne qui semble s'être formée sans grands transports mais où l'altération chimique par des eaux continentales et la remise en suspension des sédiments les plus fins n'ont laissé qu'un héritage de minéraux très résistants.

7 - 4 . La Texture

7 - 4 - 1 - Introduction des paramètres statistiques classiques

Les opérations classiques de tamisage, chronométrage au tube d'Emery, densimétrie (voir annexe) ont permis de faire pour chaque échantillon de sable ou de vase une analyse de la répartition en taille des grains minéraux (donc débarrassés de toute matière organique) qui le composent.

La texture est, en quelque sorte, la description de l'architecture du sédiment.

Les grains de sable ou de vase sont donc considérés comme une population statistique, à cela près qu'ils sont pesés et non dénombrés. Une répartition parfaitement gaussienne sera donc déformée de façon logarithmique et la courbe normale deviendra "log-normale". Une échelle logarithmique des dimensions rétablit aisément une représentation analogue aux statistiques courantes.

Si cette courbe est parfaitement régulière, on a :

$$\text{Diamètre moyen} \dots\dots\dots x = \frac{P_{84} + P_{16}}{2}$$

(paramètre de position)

$$\text{Ecart-type} /. \dots\dots\dots \sigma = \frac{P_{84} - P_{16}}{2}$$

(paramètre de dispersion)

P_{16} = Percentile 16 = Dimension telle que 16 % des grains soient de dimensions inférieures.

P_{84} = Percentile 84.

La courbe limite est alors une courbe "en cloche" parfaite suivant une ordonnée arithmétique et une abscisse logarithmique et parfaitement définie du point de vue mathématique par son diamètre moyen et son écart-type.



Mais cette perfection est rarement observée dans la nature où médiane M (percentile 50) et diamètre moyen sont rarement confondus. La courbe n'est plus tout à fait symétrique et INMAN a chiffré arbitrairement cette "asymétrie" par un paramètre :

$$\alpha = \frac{\bar{x} - M}{\sigma}$$

Ici, $\bar{x}$, σ et α furent calculés après détermination graphique de P_{50} , P_{84} et P_{16} sur la courbe cumulative. Pour cela, il est bien évident que l'échelle des abscisses doit être arithmétique ; il n'est donc pas question d'utiliser directement les dimensions des particules mais leur logarithme.

C'est l'échelle Φ , la plus courante, qui est utilisée ici en abscisse. Elle se définit par un nombre Z, lié au caractère étudié y (dimension) par la relation :

$$Z = -\log_2 y$$

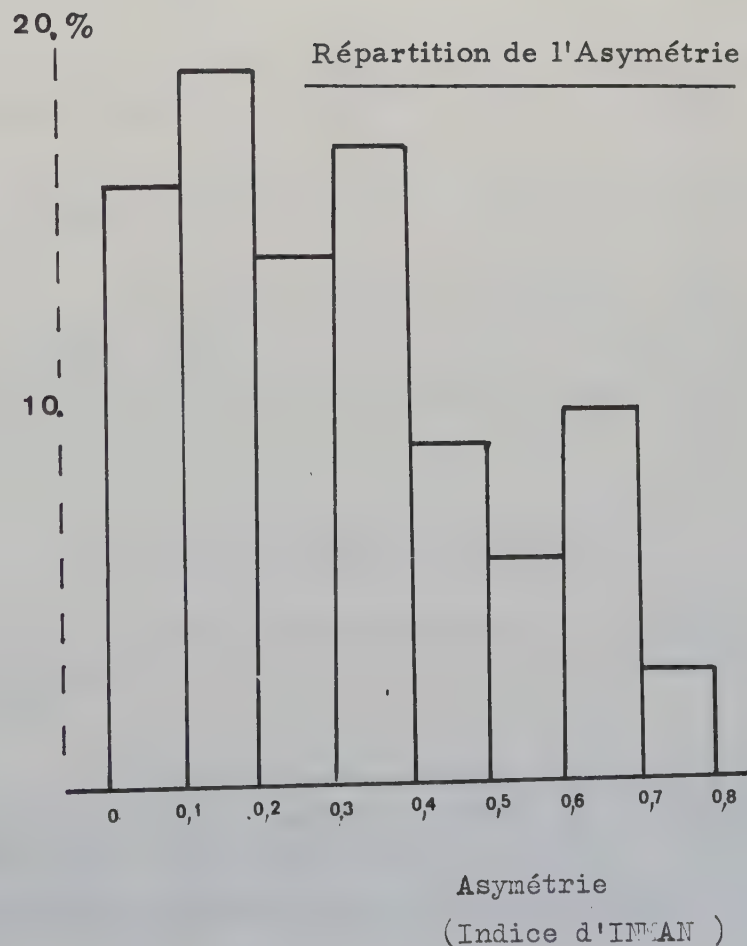
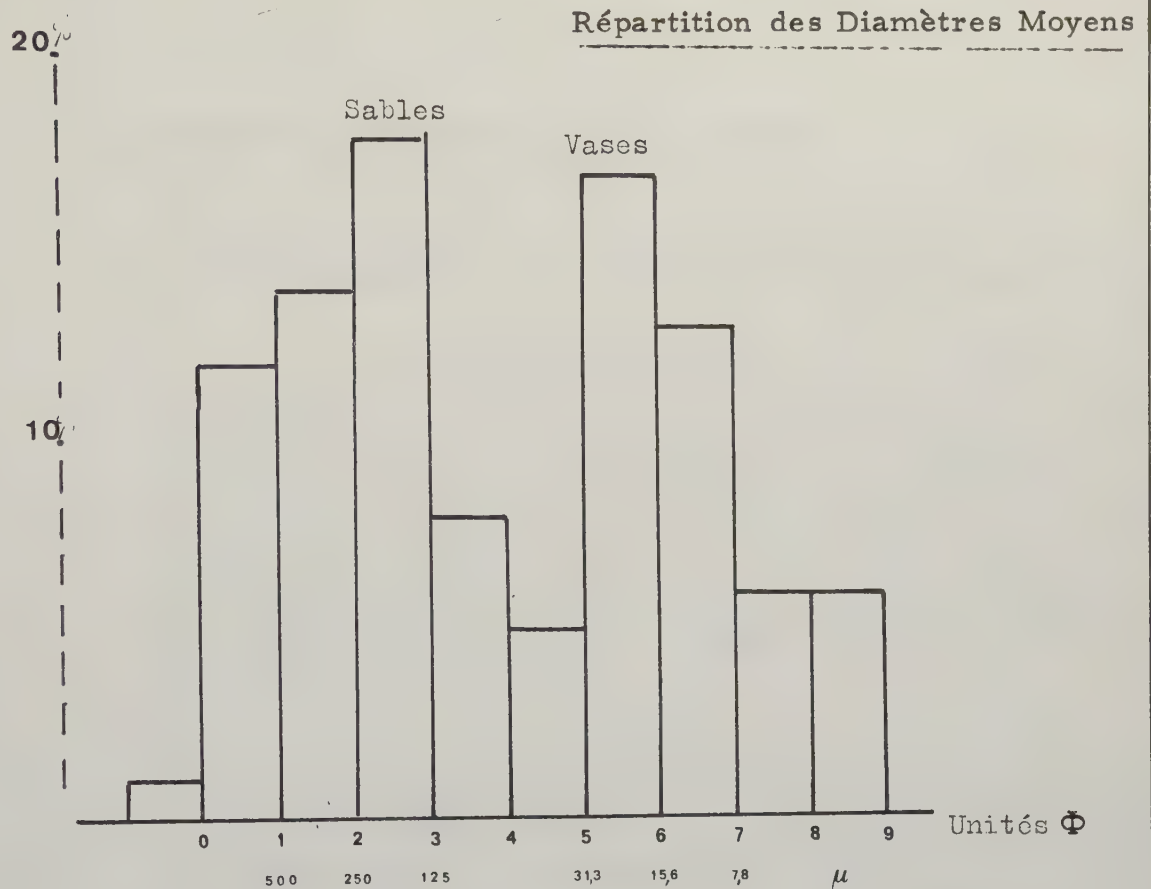
7 - 4 - 2 - Description générale de la texture des échantillons.

Un histogramme de diamètres moyens (fig.7-16) établi sur 100 échantillons de l'estuaire, la rade et des passes, décrit la répartition des diamètres moyens des échantillons. On y distingue deux groupes de sédiments, les sables et les vases, les sédiments intermédiaires (sables vaseux par exemple) étant très peu représentés.

Les sables grossiers (diamètres moyens $> 1mm$) sont très rares, la classe prépondérante représentant des tailles comprises entre 125 et 250 microns.

Les vases fines sont rares, elles aussi, les classes dimensionnelles les mieux représentés sont des lutites et notamment les classes de dimensions comprises entre 7, 8 microns et 31,3 microns.

Cette séparation brutale entre sables et vases est encore plus sensible lorsqu'on reporte le diamètre moyen

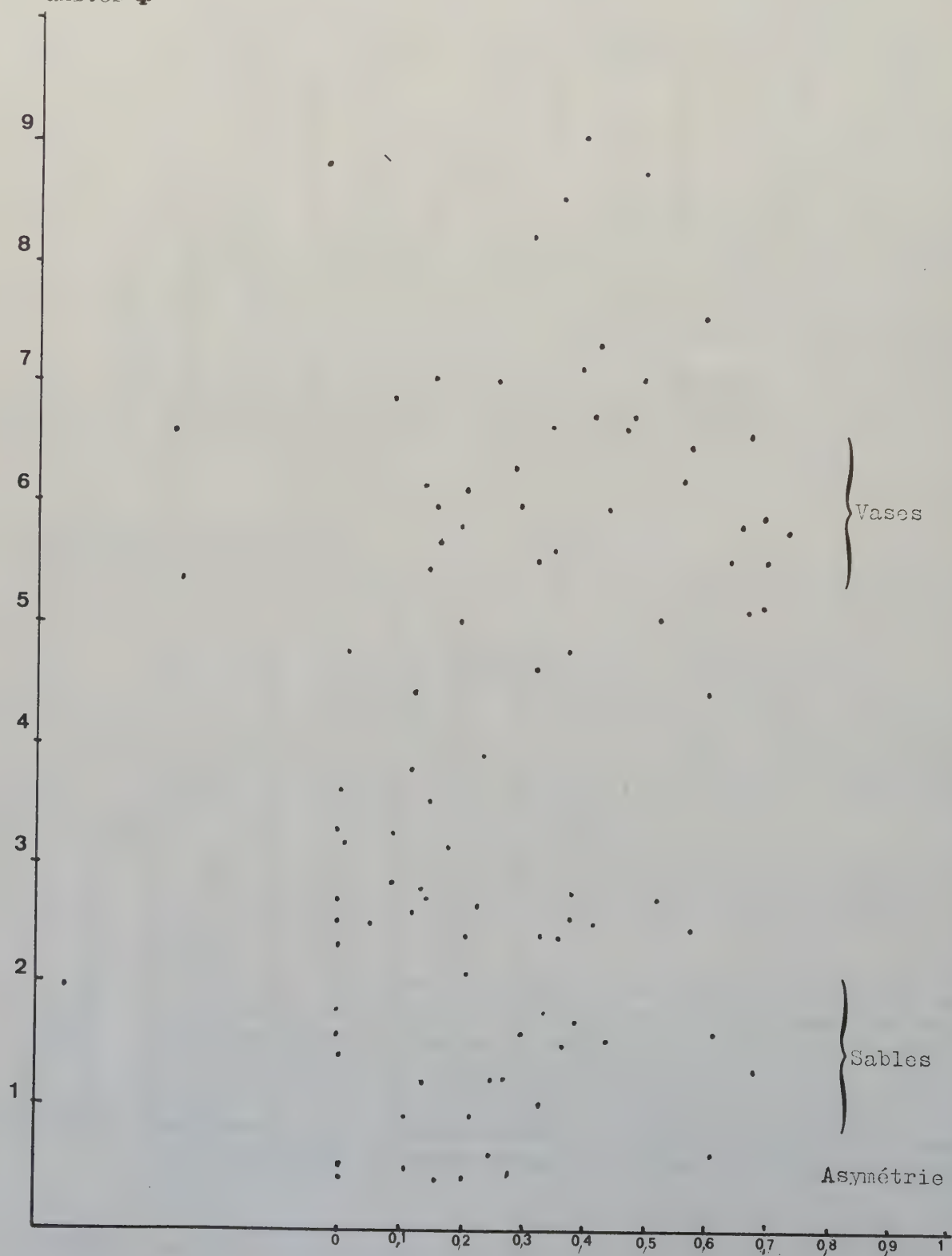


De plus, 4% des échantillons ont une asymétrie négative.

FIG 7.17

Diamètre moyen en fonction de l'asymétrie

Diamètres moyens
en unités Φ



en fonction de l'asymétrie (fig.7-17) et plus encore lorsqu'on reporte le diamètre moyen en fonction de l'écart-type (fig.7-18).

Les vases paraissent suivre grossièrement une loi reliant leur diamètre moyen à leur écart-type. Plus elles sont fines et plus leur spectre de dispersion en taille est étendu. Il n'en va pas de même pour les sables, qu'ils soient issus des passes ou des arènes des bords de l'estuaire. La répartition générale des valeurs de l'écart-type (fig.7-19) montre deux maxima. Ceux-ci sont dûs à cette différence entre dispersion des sables et dispersion des vases, bien mise en relief sur la fig.7-20 où l'on voit que plus de 50% des sables sont peu ou pas dispersés.

L'asymétrie n'est que rarement négative (4% des échantillons). Le classement s'exerce donc préférentiellement vers les éléments fins. Les classes prépondérantes sont cependant situées à des valeurs faibles de α ; très peu de sédiments possèdent donc un meilleur classement dans leurs particules très fines.

Les caractères essentiels de cette analyse texturale sont donc les suivants :

- sables et vases sont bien distincts et les mélanges rares,

- la population des échantillons de vase, mis à part quelques exceptions (voir chapitre 8) présente une homogénéité extraordinaire (surtout visible sur la figure 7-18) et cela quelle que soit l'origine de ces échantillons : échantillon de slikke, de schorre, de chenal.

7 - 4 - 3 - L'analyse texturale proprement dite

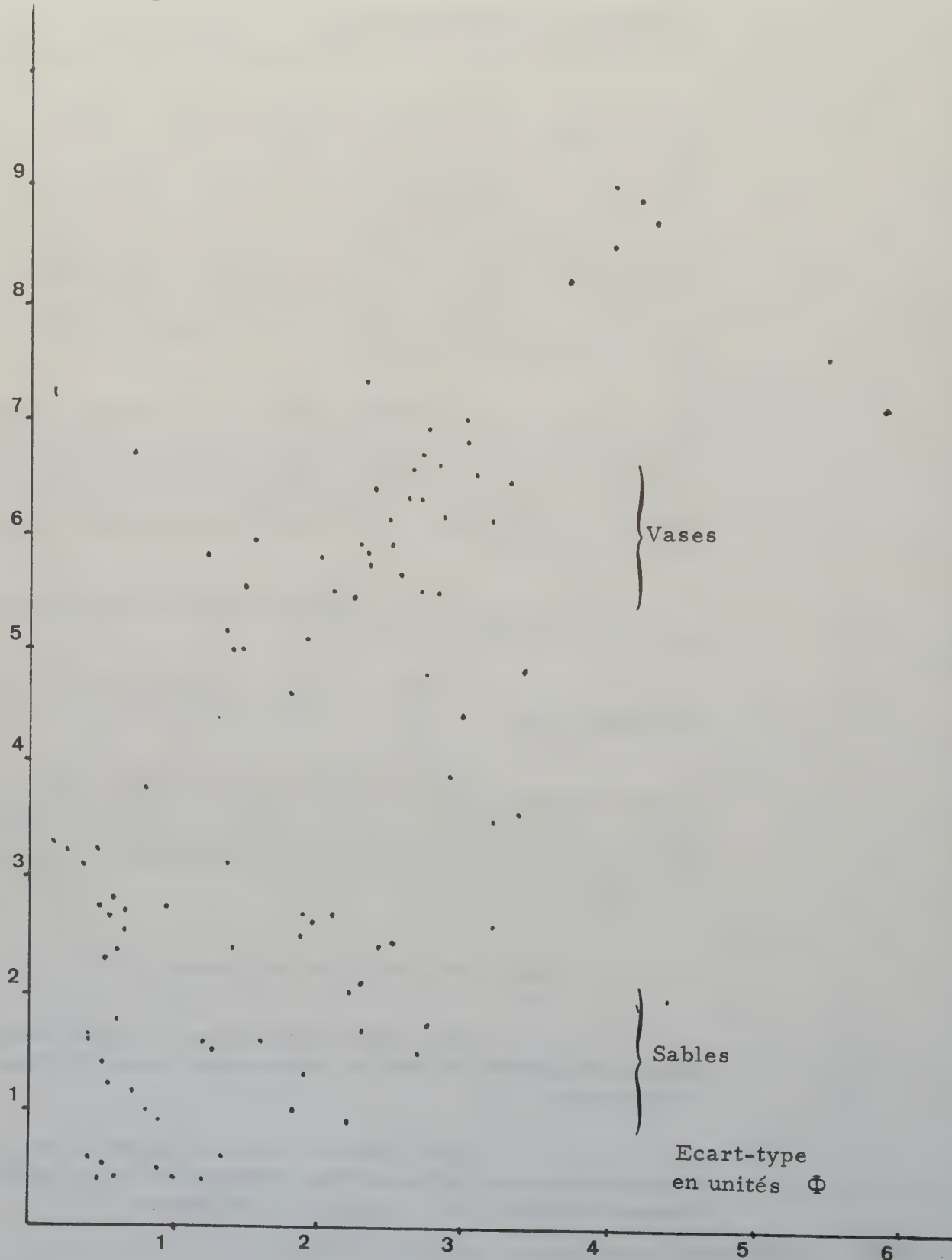
— — — — —

Dans chaque échantillon, la répartition des tailles des particules peut en elle-même donner d'utiles renseignements.

Ainsi, pour les vases, l'aspect le plus fréquemment observé est celui d'un mélange de deux populations dimensionnelles (voir polygones de fréquences 7-21) :

Diamètre moyen en fonction de l'écart-type

Diamètres Moyens
en unités Φ



40. %

Répartition des écarts-types

Fig. 7-19

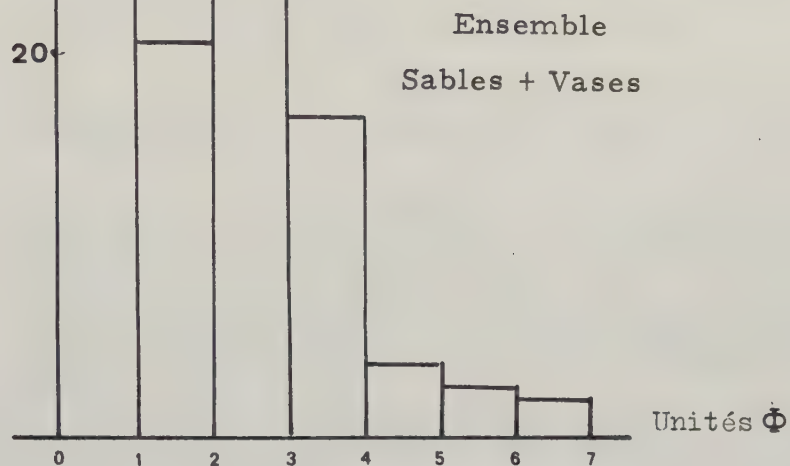
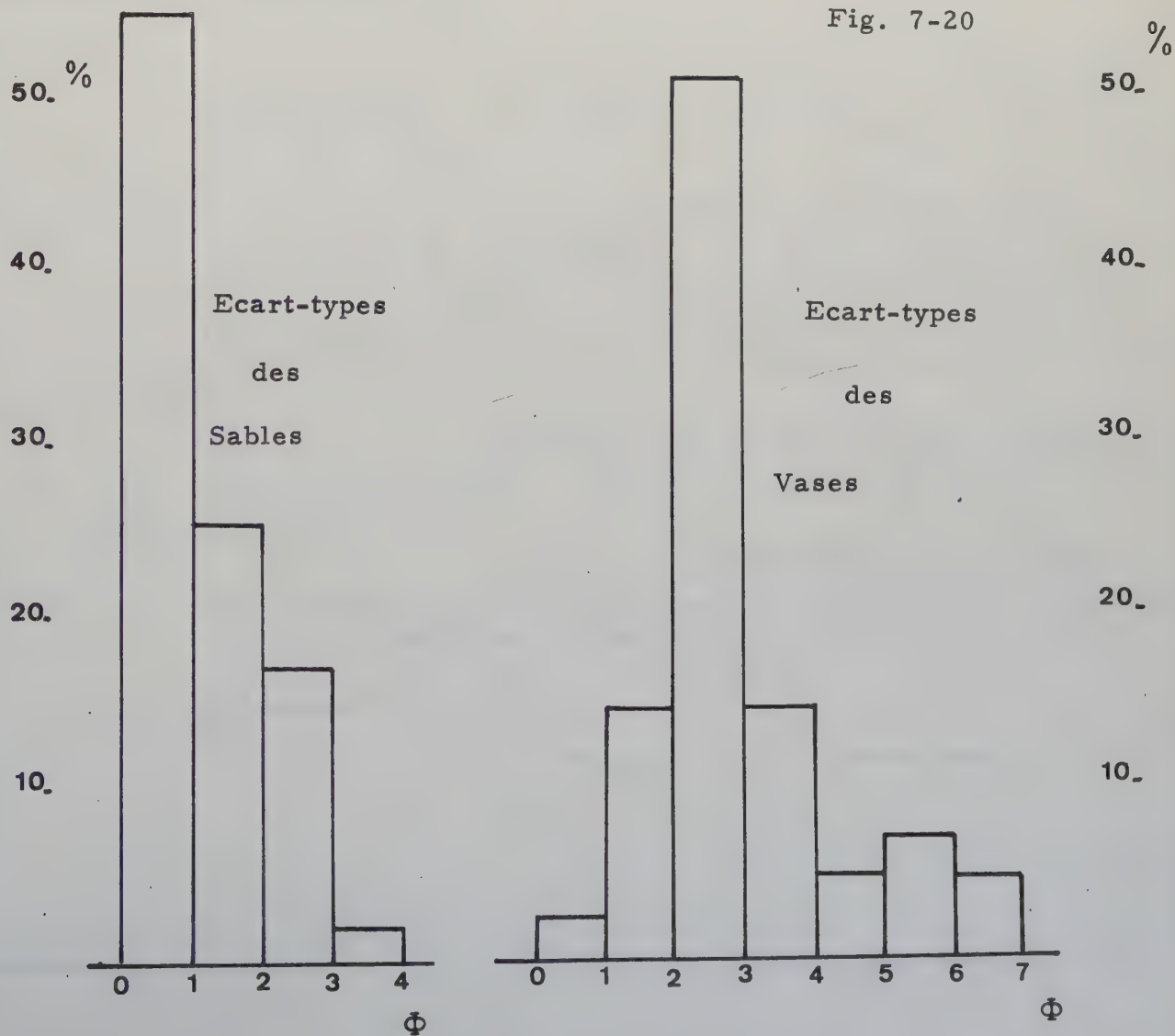
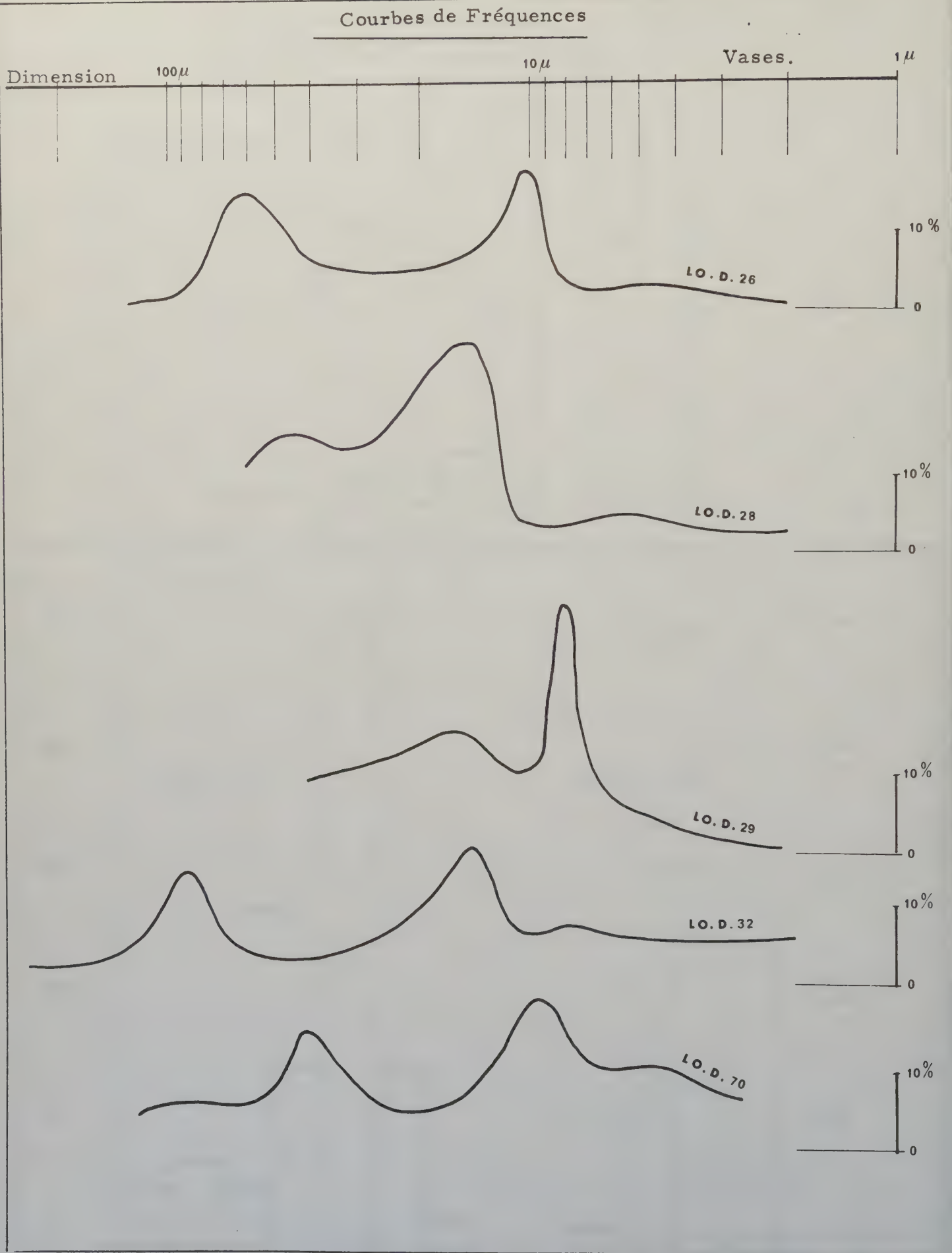


Fig. 7-20





- d'une part, une population de lutites assez grossières dont les dimensions moyennes sont assez variables suivant l'échantillon (de 30 à 80 microns) ;

d'autre part, une population dont la dimension du mode paraît assez constante (entre 10 et 15 microns).

Ce mélange se marque bien sur les courbes cumulatives tracées en ordonnées de probabilités. La loi normale de distribution est alors dans ce système décrite par une droite ; la présence de deux droites distinctes définit donc deux distributions et partant deux populations (DOEGLAS, 1962).

La figure 7-22 montre de tels exemples.

7 - 5 - CONCLUSION

C e chapitre a donc voulu présenter une description statique des sédiments superficiels et notamment de la vase qui couvre plus de 90 % de la surface totale de l'estuaire.

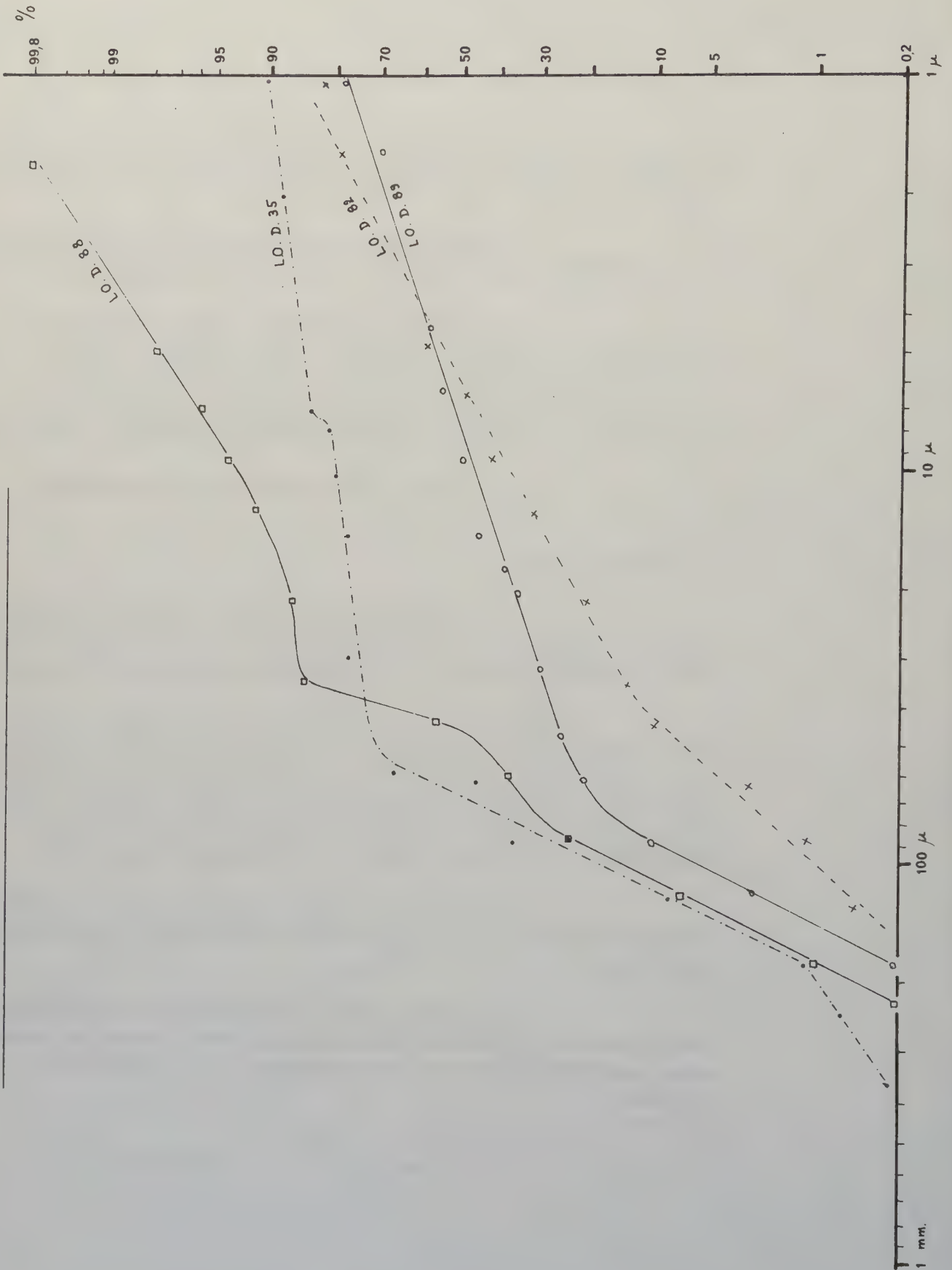
C'est un sédiment dont la fraction minérale est essentiellement composée de quartz, feldspaths et muscovite ; la fraction argileuse est peu importante et la dimension moyenne des particules correspond à celle des lutites. L'analyse minéralogique et l'analyse texturale s'accordent pour reconnaître une double origine à ce sédiment superficiel :

Des apports actuels modifient un sédiment ancien formé sur place et ces apports paraissent essentiellement fluviaux.

La simple description débouche ainsi sur le double problème du bilan sédimentaire actuel, donc des relations entre hydrodynamique et sédimentation et de la genèse de l'estuaire.

FIG 7.22

Courbes cumulatives en ordonnées de probabilités



CHAPITRE VIII

LA DYNAMIQUE DES SEDIMENTS - BILAN SEDIMENTAIRE

Position du problème.

Les déplacements de sédiments dans la zone maritime.

Les déplacements actuels de sédiments dans la zone estuarienne.

Renseignements fournis par les traces biologiques.

L'histoire de la sédimentation.

Conclusion.



8 - 1. Position du problème

Les chapitres précédents se sont attachés à définir les mouvements de l'eau d'une part et la nature des sédiments d'autre part. Il reste, maintenant, à relier les deux en décrivant le transport du sédiment par l'eau.

Pour chaque région sédimentologique (voir chap.7), il paraît donc nécessaire de voir si de telles liaisons existent actuellement. Il sera, peut-être, alors possible d'interpréter la sédimentologie du passé à la lumière de ces résultats.

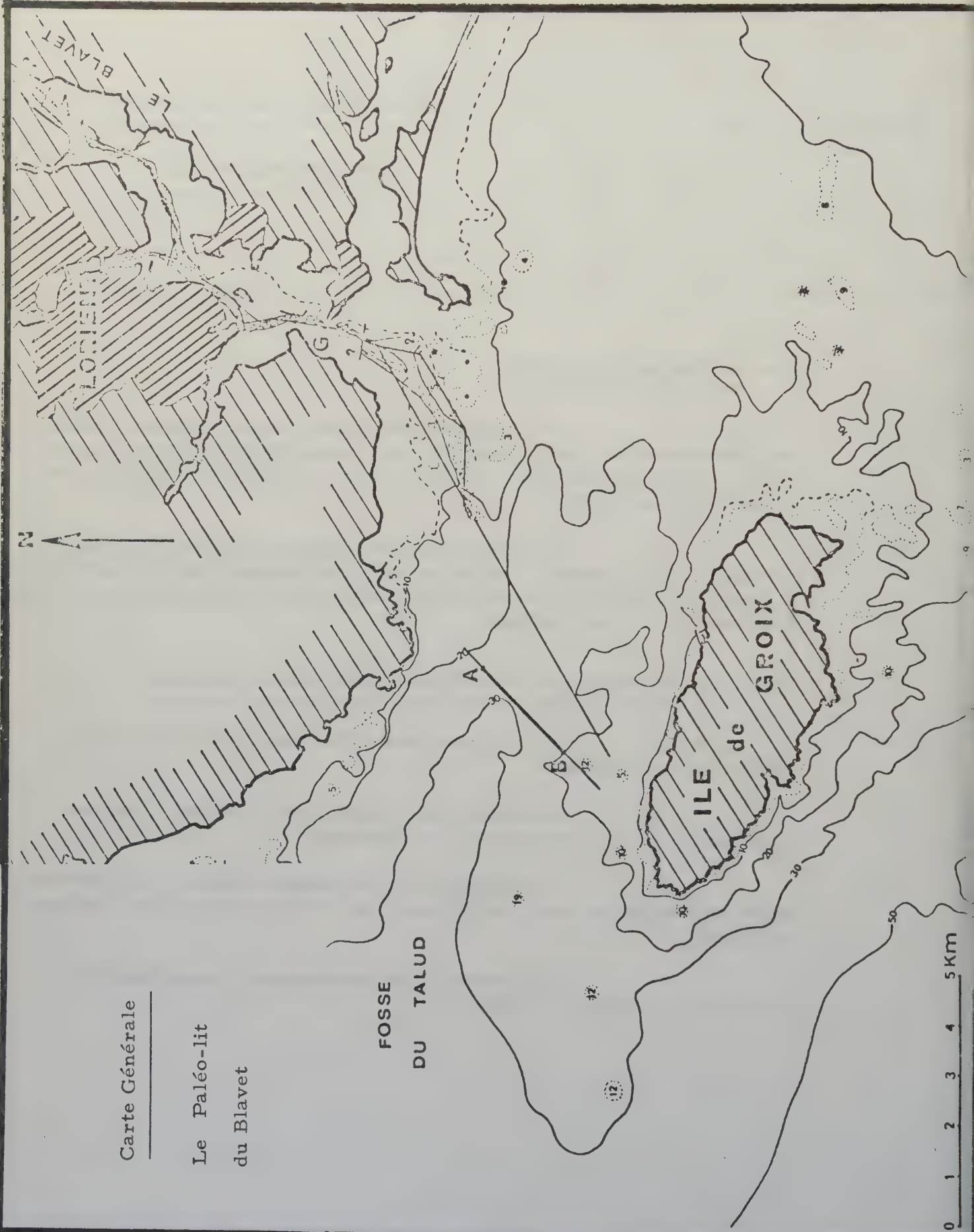
8 - 2. Les déplacements de sédiments dans la zone maritime

La zone maritime s'étend au sud de Port-Louis, entre Groix et le littoral.

Les études de courants (voir chapitre 2) avaient déjà permis d'y distinguer trois subdivisions :

- un plateau où la profondeur varie de 20 à 25mètres, recouvert de sables moyens et grossiers. C'est en gros "les Coureaux de Groix" ;

- une fosse où les profondeurs s'accroissent à -35 mètres, la Fosse du Talud ;



- la sortie de l'estuaire par le goulet de Port-Louis et les chenaux naturels du Sud et de l'Ouest ; c'est la zone des passes.

- Enfin, le littoral avec ses phénomènes de transport très particuliers.

8 - 2 - 1. Les Coureaux de Groix

8 - 2 - 1-1. Les renseignements fournis par l'analyse des sédiments. - -----

La récolte des échantillons dans cette zone fut très peu poussée du fait de la présence d'une vaste zone de passage de câbles interdisant le mouillage et le dragage.

Les abords immédiats de la Fosse du Talud (voir carte 8.2. zone 4) présentent assez bien les conditions limites de cette sédimentation sableuse.

Le diamètre moyen des échantillons est très élevé (4mm).

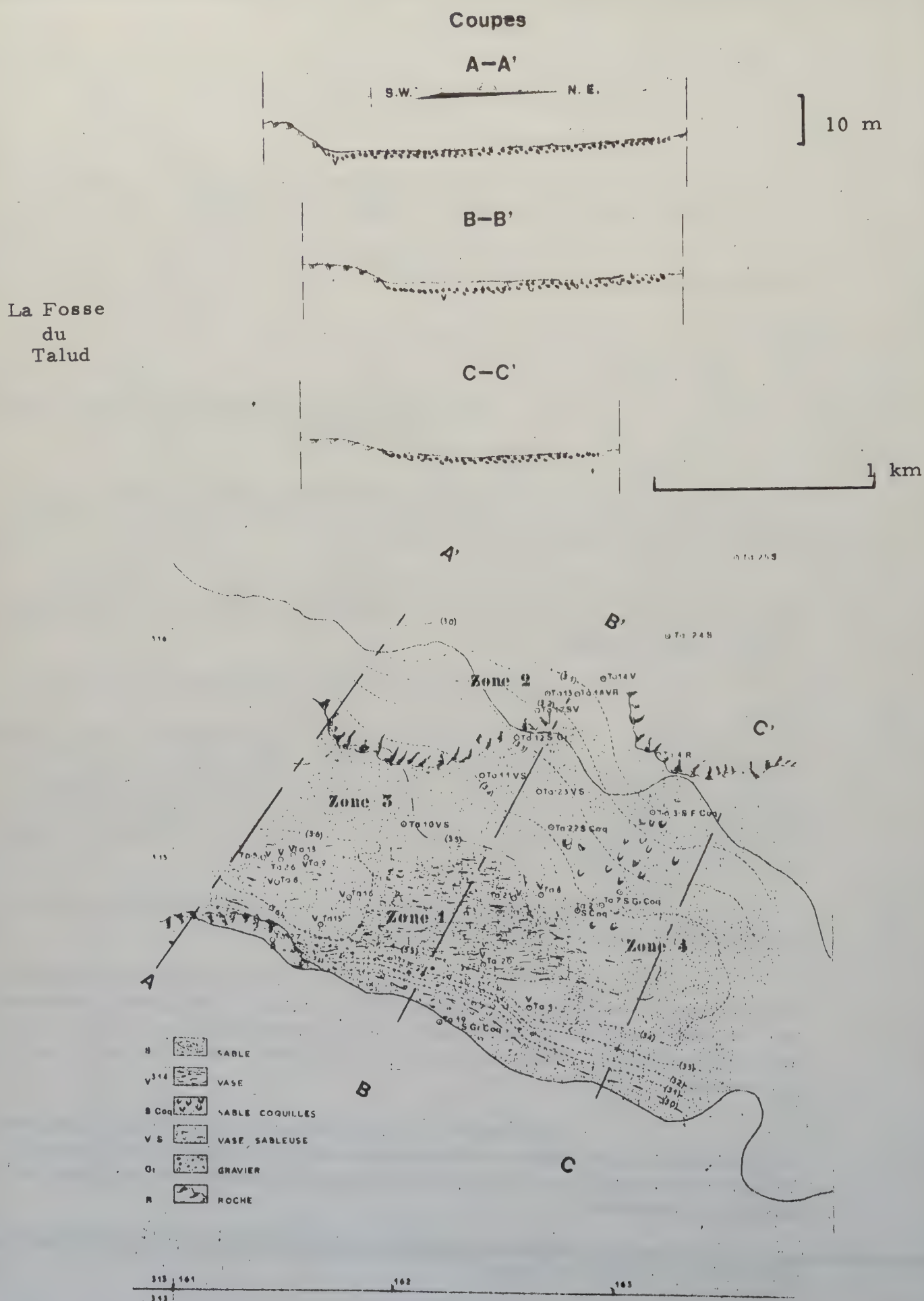
Le calcul de la houle de 10" de période, soit la période la plus fréquemment observée actuellement (voir chapitre 3), capable de remettre en mouvement de tels sédiments, fournit d'après les abaques de Bonnefille et Pernecker, des valeurs d'amplitude très légèrement supérieures à 10 mètres pour une profondeur de l'ordre de 25m et une température d'eau moyenne de 15°.

On retrouve donc là la valeur des houles décennales du chapitre 3, valeur qui paraissait alors très élevée.

De plus, à 3/4 de mille au Sud-Est de la Pointe-du-Talud, des observations en plongée d'Yvon Moign révélèrent l'existence de "ridens" parallèles au rivage de 30 à 50cms de hauteur et 1 à 2 m de longueur d'onde. Par mer zéro, ces "ridens" sont d'ailleurs visibles au sondeur.

L'action de la houle d'ouest paraît donc déterminante sur le transport et l'accumulation de ces sédiments dont le mouvement, vu leur dimension, sous l'action de courants d'un noeud (voir chapitre 2) paraît peu probable.

Le transport sous l'action de la houle se ferait donc vers l'Est et vers le rivage.



Mais l'action conjuguée houle-courants peut présenter des effets assez différents.

8 - 2 - 1 -2. Mise en évidence des phénomènes de suspension

Les 6 et 7/3/1967, sur un fond de sable grossier (point T A₂, figure 8-1) on a noté toutes les 20 minutes la transmission de la lumière à un mètre au-dessus du fond, et ce, pendant douze heures. L'appareil ne se stabilisait pas sur une valeur fixe et c'est ainsi que la figure 8-3 représente les valeurs les plus fortes et les plus faibles de la transmission optique notées pour chaque mesure :

- les valeurs élevées correspondent à une teneur en suspension faible (100% pour l'eau distillée),

- les valeurs faibles à une teneur en suspension forte.

La teneur moyenne (60% de transmission) correspond à 0,015 g/l (étalonnage par prises d'eau) ce qui est très faible. L'asymptote est à 0,090 g/l.

Trois prises d'eau d'étalonnage à la bouteille horizontale (OTTMANN) ont confirmé que le sédiment en suspension était très fin et sans grand rapport avec le sable grossier quartzeux et calcaire du sol sous marin.

La mer était force 3 donc incapable de remettre en mouvement un sable grossier à - 25 mètres.

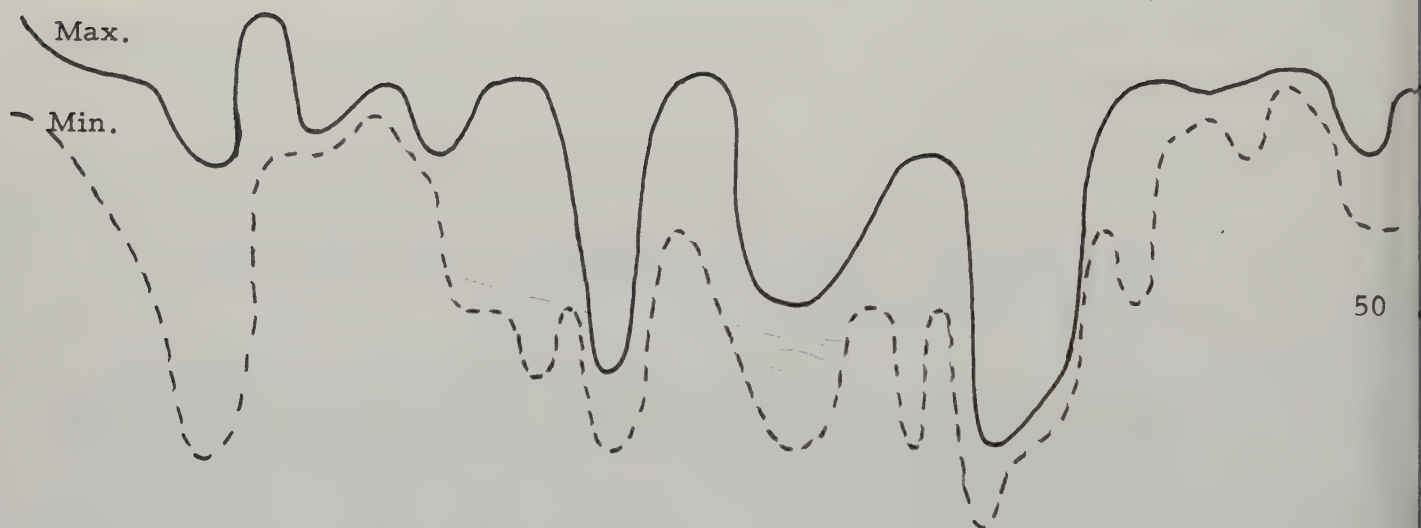
La présence de telles suspensions peut alors s'expliquer par celle de dépôts de vases tout proches (voir carte 2-1) et situés à l'Est. La houle en remettant des sédiments fins en suspension les placerait donc sous l'action du courant dont le chapitre 2 a montré, surtout près du fond, que la direction résultante était dirigée vers l'Ouest.

Tout apport de sédiments fins dans cette zone se concluerait donc par un déplacement vers l'Ouest alors que les sédiments plus grossiers auraient tendance, eux, à progresser vers l'Est.

Transmission de la lumière à 1m de fond.

Fosse du Talud les 6 et 7 -3- 1967

Transmission 100%



Heures T.U.

20h 0h

4h

8h

8 - 2 - 2 . La Fosse du Talud

Cette fosse (voir carte 8-2) se présente comme une cuvette allongée d'axe Nord-Ouest/Sud-Est, avec une dissymétrie accusée entre le flanc Sud abrupt et le flanc Nord en pente douce. Cette dissymétrie est parfaitement visible sur les trois profils en travers.

Sur ces coupes, les hauteurs sont exagérées dix fois. Le relief est donc très peu accusé ; le fond est relativement plat sans ondulations de courants.

Les profondeurs maximales dans l'axe sont de l'ordre de 36 mètres et la pente du bord Sud s'accroît vers le Nord-Ouest.

L'allure générale des courbes de niveau du sondage hydrographique (voir carte 8-2) indique nettement que la pente longitudinale est faible, inférieure à un mètre par kilomètre.

Les sédiments sont répartis dans cette fosse sur quatre zones principales, dont la plus importante du point de vue de la sédimentation est la zone 1.

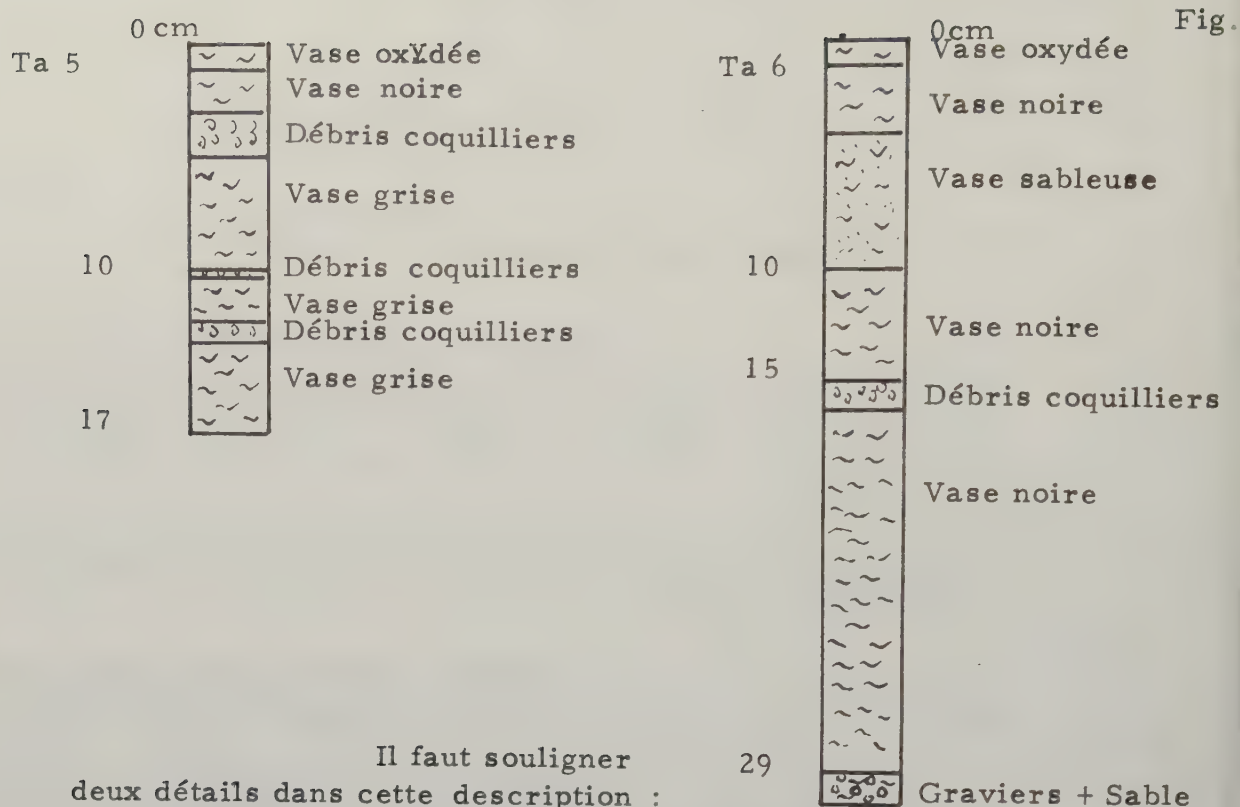
C'est en effet une nappe vaseuse, située au maximum de profondeur de la Fosse, c'est-à-dire près du flanc Sud.

Cette présence insolite de vase au milieu de sables grossiers a paru mériter une étude plus particulière quant à son origine.

8 - 2 - 2 - 1. Renseignements fournis par la structure
de la nappe

Cinq carottages (trois au carottier à piston et deux par gravité) ont révélé que cette couverture de vase était peu épaisse : 30 à 40 cm parfois moins (Ta 5, 18 cm). La couche sous-jacente est constituée de graviers et de galets.

Les deux carottages par gravité présentent les coupes suivantes.



Il faut souligner
deux détails dans cette description :

- La présence en surface d'une pellicule jaunâtre (un centimètre) résultant des phénomènes nouveaux d'oxydation de la vase au contact d'eaux oxygénées. C'est l'indice de fréquentes remises en suspension.
- La présence de débris calcaires organiques de petites dimensions (0,7mm) dans cette couche superficielle, de même que des passages de débris identiques dans les couches inférieures. Ces passages calcaires sont constitués de fragments de coquilles indéterminables et de tests entiers de foraminifères planctoniques.

8 - 2 - 2 - 2. Renseignements fournis par l'analyse
des échantillons

La teneur en eau de cette vase est de 142% (teneur exprimée par rapport au sédiment sec) ce qui se traduit par une densité humide de 1,3 seulement. Les essais au scissomètre fournissent une valeur de cohésion de 24 grs par cm^2 , c'est-à-dire celle d'une vase très fluide.

La finesse du sédiment lui-même le prédispose à une facile remise en suspension. C'est ainsi que pour l'échantillon TA₁₆, le diamètre moyen est 10 microns, ce qui d'après l'abaque de Bonnéfille et Pernecker assurerait des remises en mouvement à 40m par des houles de 10" très faibles (inférieures à un mètre).

Mais c'est l'analyse chimique qui fournit les renseignements essentiels. Après élimination de l'eau, du calcaire d'origine organique et du sel marin, les résultats de deux échantillons peuvent être présentés ainsi :

	Echantillon TA O1	Echantillon TA O9
SiO ₂	62, 82	58, 22
Al ₂ O ₃	18, 95	20, 25
Fe ₂ O ₃	6, 88	7, 74
Ca O	traces	traces
Mg O	3, 28	4, 07
Na ₂ O	3, 60	5, 21
K ₂ O	3, 35	3, 35
Ti O ₂	0, 94	0, 94
P ₂ O ₅	0, 14	0, 22
Mn O	0, 04	néant
Total	100, 00	100, 00

L'attribution de la chaux, dosée après élimination des carbonates, aux plagioclases, conduit à penser que ces derniers sont ici inexistantes. L'analyse aux rayons X confirme ce résultat. Ceci mis à part, leur description minéralogique est en tout point analogue à celle des vases de l'estuaire.

Déjà (paragraphe 7-3-3-3), deux échantillons de l'estuaire montraient cette particularité de ne présenter que des feldspaths alcalins. C'étaient dans des zones d'envasement deux échantillons d'origine fluviale, l'un au débouché du Scorff (148), l'autre du Blavet (79).

De plus, les pertes au feu de ces deux échantillons sont considérables :

17,25 % pour TA O1

20,25 % pour TA O9.

enfin, les teneurs en calcaire (18%) sont nettement supérieures à celles de la majorité des vases de l'estuaire.

En résumé, on peut penser que l'on a affaire ici à un sédiment d'origine terrigène certaine mais n'ayant pas subi longtemps l'influence de l'altération des eaux continentales (prépondérance des feldspaths alcalins). La reprise de ce sédiment en milieu marin se marque par l'apport de coquilles brisées et de foraminifères planctoniques.

La très faible dimension du sédiment, sa forte proportion en matières combustibles, donc de faible densité, font songer à un classement.

En rapprochant ces données des observations du paragraphe 8-2-1, on peut conclure que la mince pellicule qui recouvre le fond de la Fosse du Talud est le produit d'une sédimentation actuelle. Elle provient :

- soit directement du Blavet et du Scorff - et cette halte dans la Fosse du Talud s'expliquerait par la faiblesse des courants qui règnent au fond (voir chapitre 2) -,

- soit indirectement par l'intermédiaire des dépôts de dragages. Ces derniers sont situés à l'Est et l'on retrouve, en tous cas, la même démonstration de transports de sédiments fins vers l'Ouest.

Le courant, et principalement le courant de pente, est donc là, l'élément de transport essentiel.

Le déplacement des sédiments fins en suspension vers l'Ouest, sous l'action de ce courant, serait donc lié, par là, à des éléments climatologiques (importance des vents de Ouest-Sud Ouest, voir chapitre 2), dont la permanence dans les temps passés est discutable.

8 - 2 - 3. La zone des passes

C'est une zone intermédiaire, en principe une zone de transit de sédiments de la mer vers l'estuaire ou de l'estuaire vers la mer. En fait, le problème se résume à l'influence de deux modes de transports : la houle et les courants. L'action de la houle correspond à un apport de sédiments sableux et les courants à un apport de sédiments fins de l'estuaire ; les courants de jusant étant prépondérants dans cette zone.

8 - 2 - 3 - 1. Les renseignements fournis par l'analyse des sédiments.

La carte 8-5 représente la répartition géographique des différents paramètres statistiques de l'analyse texturale.

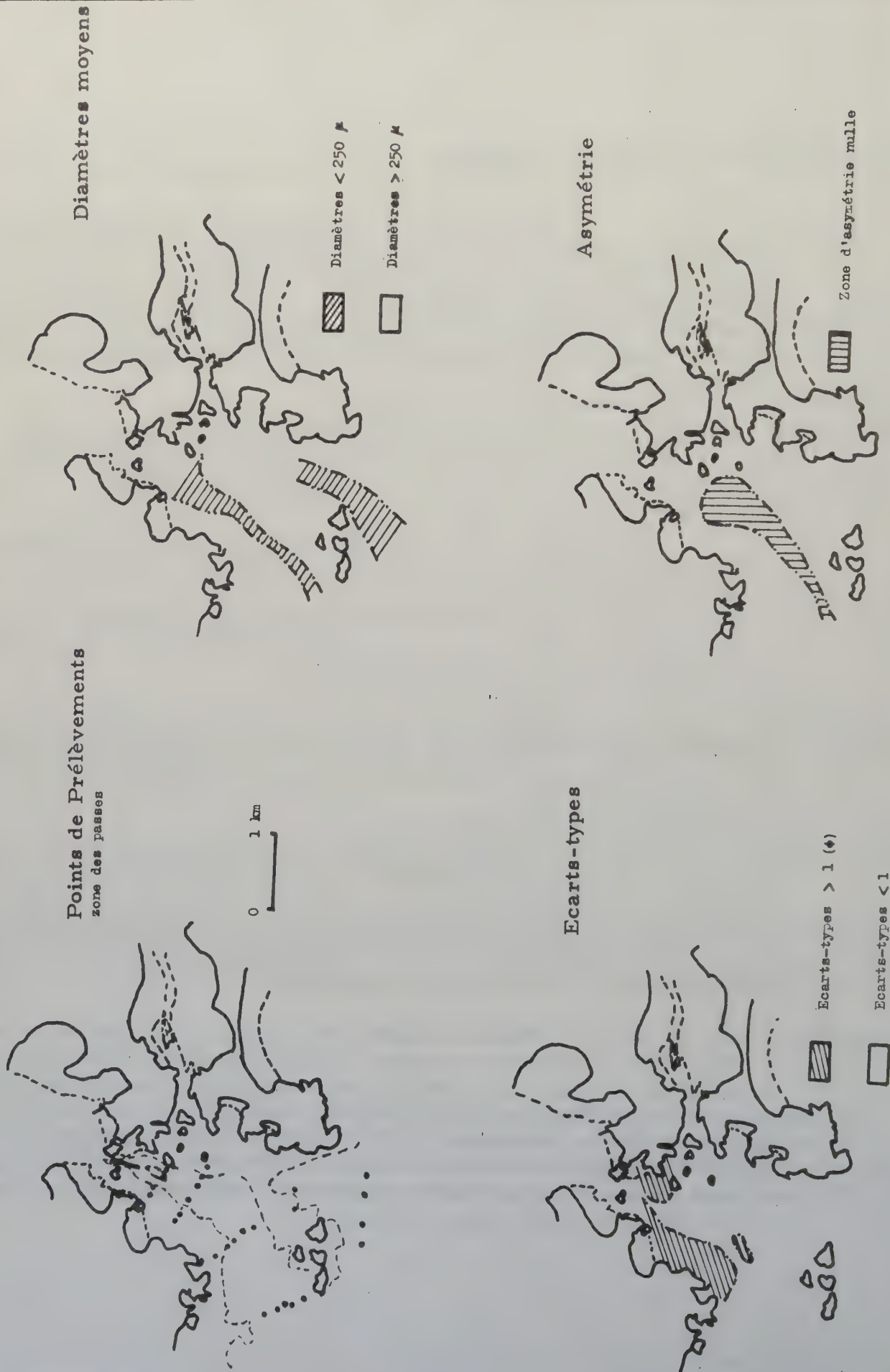
La carte des diamètres moyens suit très bien le chenal. Dans les passes, les sables sont d'autant plus fins que l'épaisseur d'eau les recouvrant est plus grande.

Les sables du chenal ont, de plus, une asymétrie nulle avec un écart-type très faible. Leur répartition granulométrique est donc très proche de la normale alors que les sables du rivage sont très hétérométriques.

Le mode de transport dont l'influence décroît avec la profondeur est évidemment la houle et pour un sable de diamètre moyen 170 microns, situé dans les passes sous 10 mètres d'eau, la houle de période de 10 secondes, capable de le remettre en mouvement aurait une amplitude de deux mètres, ce qui, même pour ces passages abrités, ne constitue pas, à priori, une impossibilité.

Il faut remonter très au Nord, au pied de la Citadelle de Port-Louis pour rencontrer les premiers sédiments fins. Encore, sont-ils placés dans une situation géomorphologique bien particulière. La sortie de Port-Louis est, en effet, marquée par l'existence de deux fosses étroites et profondes (- 26 mètres) se faisant suite dans la direction Nord-Nord Est - Sud Sud Ouest. Les sédiments fins, cités plus haut, appartiennent à la fosse Sud, la récolte d'échantillons dans la fosse Nord s'étant toujours soldée par un échec.

Sédiments de la Zone des Passes



Plus au Sud, la rupture est nette, on passe directement à des sables.

Cette fosse par l'augmentation rapide de la profondeur d'eau joue donc un rôle d'épanouissement de la houle et constitue une barrière pour la progression des sables du chenal vers l'estuaire.

8 - 2 - 3 - 2. Renseignements fournis par la
géophysique.

Une mission de sismique réflexion continue (sparker à haute définition) a permis de recueillir les données manquantes.

Une coupe longitudinale de la fosse Nord met en évidence, au fond de cette fosse, une accumulation de sédiment paraissant très fluide à l'enregistrement et localisée à l'extrémité Sud de cette fosse (voir reproduction 8-6).

Une reconnaissance en plongée par mer zéro et à l'étale de pleine mer a montré que cette accumulation était constituée d'une vase très fluide se remettant en suspension au moindre mouvement d'eau.

Cette fosse joue donc le rôle de piège à sédiments (ou de halte) pour les matières en suspension qui sortent de l'estuaire.

Il semble donc que les échanges soient très limités et pourtant, à chaque hiver, les plages de sable de la rive Ouest du Goulet de Port-Louis se modifient considérablement.

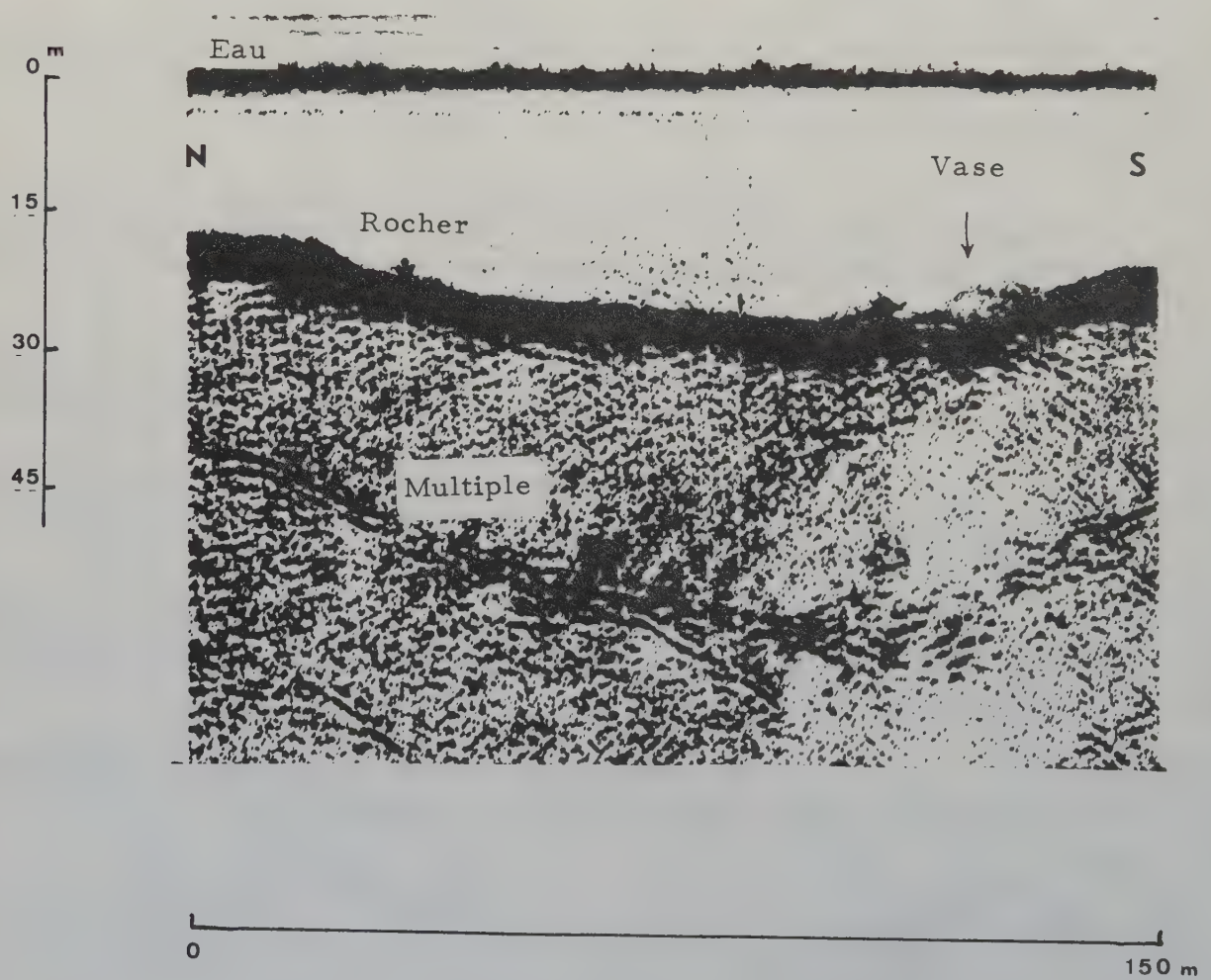
A Kernevel (voir carte 1.1.), le sable progresse l'hiver le long du rivage, et les beaux jours voient ces monticules s'évanouir.

Les transports de sédiments dans le domaine littoral doivent donc faire l'objet d'une étude particulière.

FIG 8.6

COUPE SISMIQUE NORD-SUD
DE LA FOSSE DE LA CITADELLE

Hauteurs verticales estimées dans l'hypothèse $V = 1500 \text{ m/s}$



8 - 2 - 4. Le littoral

Sur le littoral morbihannais, l'embouchure du Blavet-Scorff sépare deux types de côtes différents : à l'Ouest, vers le Pouldu (voir carte 1-1), alternance de petites plages et de pointes rocheuses, à l'Est, grande plage s'étendant sans discontinuité de Gâvres à Quiberon.

Une étude (GROVEL, BROSSE, 1967) a porté sur trente échantillons de plage recueillis sur l'estuaire, à marée basse, après les marées de l'équinoxe du printemps 1966.

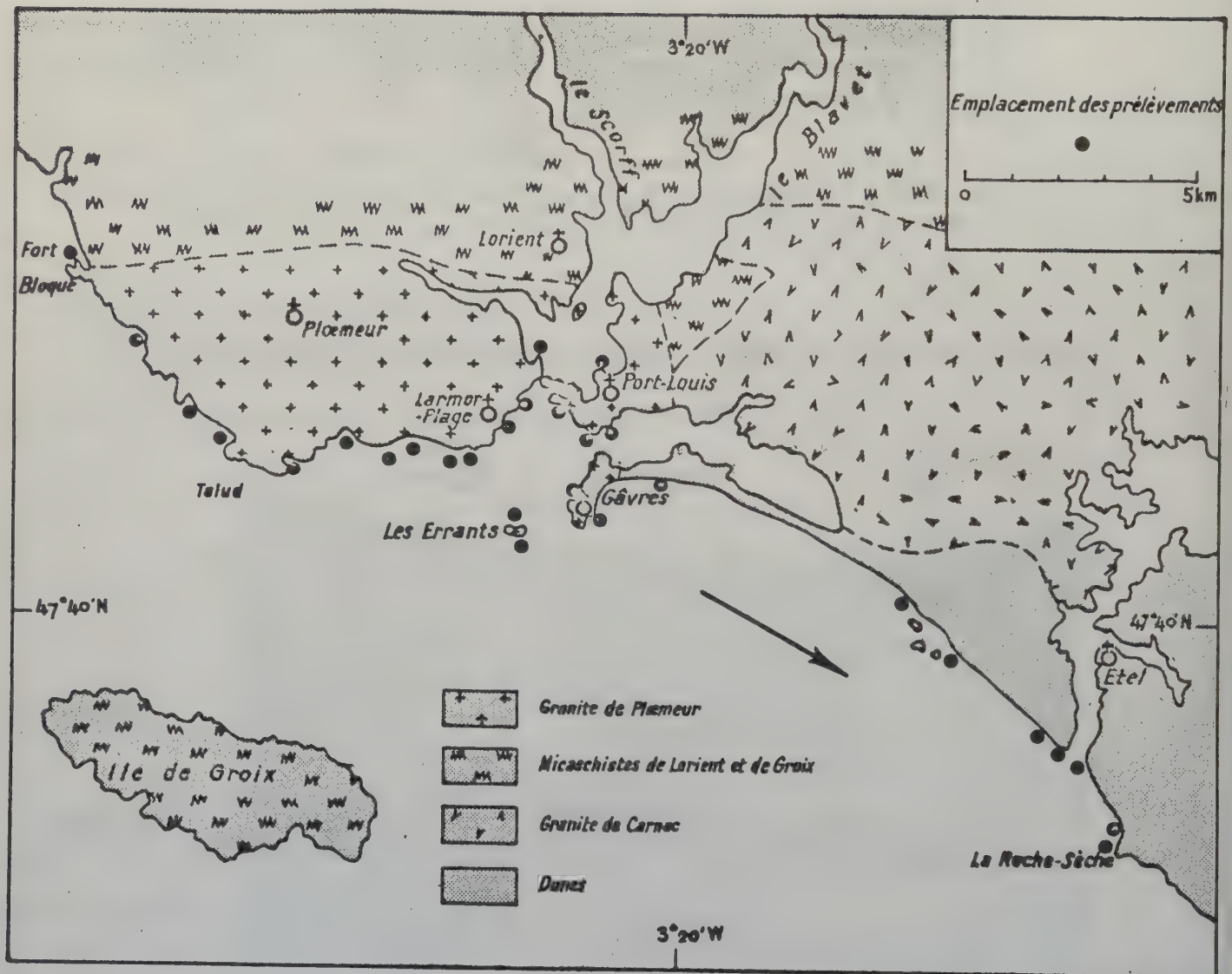
8 - 2 - 4 -1. Les renseignements fournis par
l'analyse des échantillons.-

Ces sables peuvent être divisés en deux groupes :

Embouchure du Blavet-Scorff

<u>Sables de l'Ouest</u>	<u>Sables de l'Est</u>
En coupe verticale on observe la présence d'une pellicule de sables fins superficiels épaisse de 3 à 10 cm recouvrant des sables profonds plus grossiers.	- id. -
Les sables fins ont un diamètre moyen variant de 0,1 à 0,4 mm.	Les sables fins ont un diamètre moyen variant de 0,2 à 0,45 mm.
Les sables grossiers ont un diamètre moyen variant de : 0,8 à 2 mm.	Les sables grossiers ont un diamètre moyen variant de : 1,2 à 1,8 mm.
Les quartz sont blancs et non usés.	Les quartz sont émoussés, luisants et recouverts d'une patine rouille d'oxyde de fer.
Les feldspaths sont abondants et décroissent vers l'Est.	Les feldspaths sont rares.

FIG. 7



Les micas sont en quantité décroissante vers l'Est.

Les sables fins montrent sur leur courbes granulométriques (voir graphique 8-8) la prédominance d'une population à 0,17 mm ; vers l'Est, les échantillons présentent un deuxième mode à 0,09 mm.

Les micas sont inexistantes.

Les sables fins ont un mode qui varie de 0,25 à 0,35 mm ; on voit apparaître des courbes bi-modales par apport grossier, de mode 1,40 mm à l'est d'Étel.

L'alimentation en matériel sableux est donc différente à l'Ouest et à l'Est du Goulet de Port-Louis. Les sables occidentaux sont les résidus de l'altération très poussée d'un granite sous-jacent, la mer enlevant les argiles de décomposition et les lutites. Les sables occidentaux, par contre, proviennent du remaniement d'un sédiment évolué ancien.

La superposition du sable fin sur le sable grossier est variable suivant les époques ; certaines tempêtes d'hiver font apparaître par endroit, sur les plages, de grandes plaques de sable grossier qui seront, aux beaux jours, à nouveau recouvertes de sable fin.

Le cheminement vers l'Est du sable fin le long du rivage, semble cependant assez net. C'est certainement un transport par jets de rive mais, du fait que ce transport est plus net à l'Ouest où la côte est plus découpée qu'à l'Est où elle est rectiligne, il est probable que la dérive littorale (les "long-shore currents") intervient elle aussi.

La rupture causée par le débouché du Blavet-Scorff apparaît en tout cas très clairement.

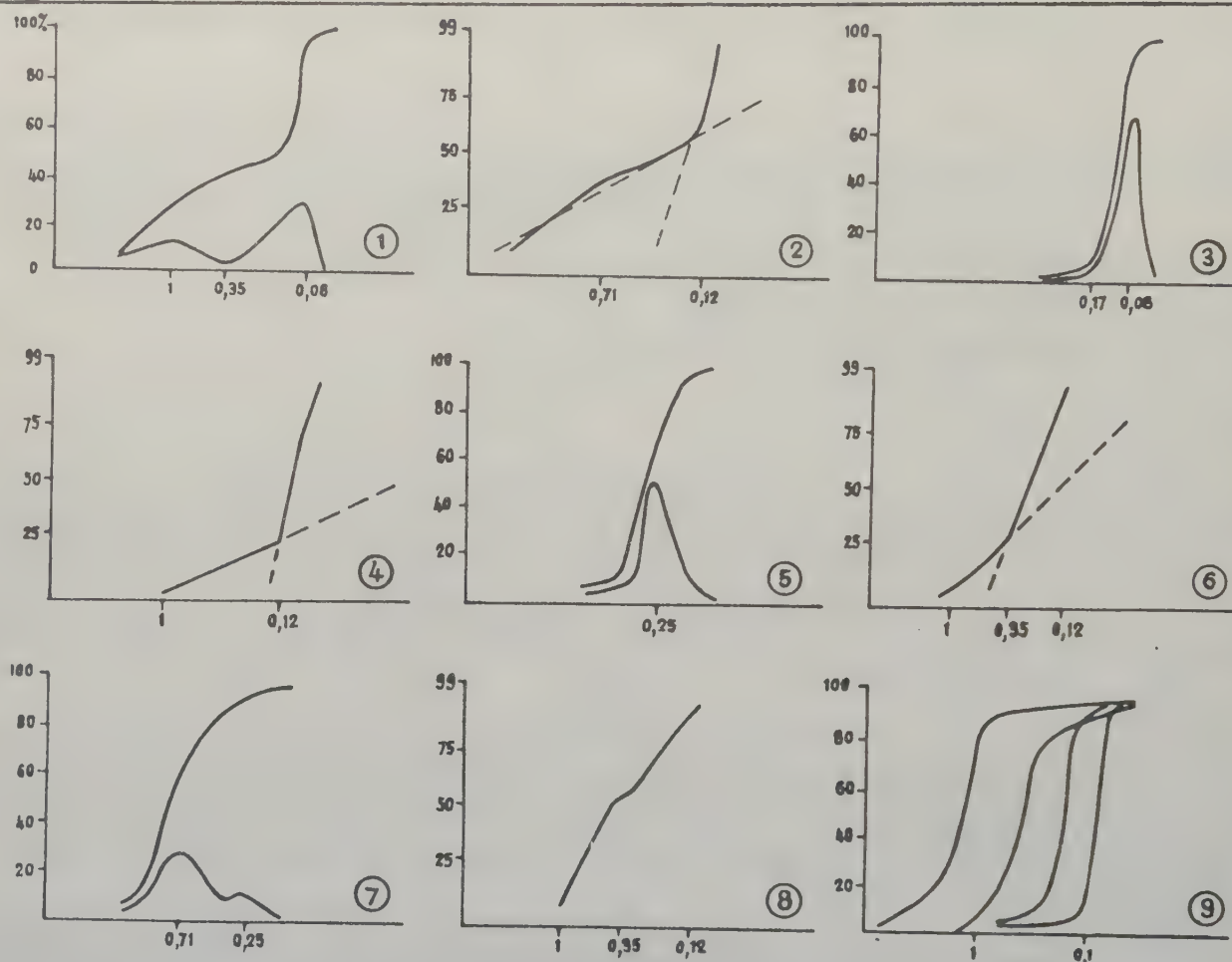
8 - 2 - 4 - 2. Renseignements divers.

Les valeurs de teneurs en carbonates (bioclastiques) et en minéraux lourds ne permettent pas de tirer une conclusion nette sur les mouvements des sables.

De même, le taux de radioactivité n'accuse pas de variation nette de l'Ouest à l'Est de cette côte.

FIG 8-8

Analyse texturale des sables de plages



• Les courbes 1, 3, 5, 7, 9 sont tracées avec en abscisse une échelle logarithmique des dimensions, en ordonnée une échelle arithmétique des fréquences.

Les courbes 2, 4, 6, 8 sont tracées avec en abscisse une échelle logarithmique des dimensions, en ordonnée une échelle des fréquences de probabilité gaussienne.

1-2- Mélange de sable fin et de sable moyen sur les plages de l'Ouest.

3-4- Sable fin des plages de l'Ouest.

5-6- Sable fin des plages de l'Est.

7-8- Mélange de sable fin et de sable grossier sur les plages de l'Est.

9- Enveloppe des courbes cumulatives des sables fins (A) et des sables grossiers (B).

Ce sont les observations sur le terrain qui sont encore les plus intéressantes : toutes les anses ouvertes vers l'Ouest voient se former des accumulations de sable importantes.

Toutes les côtes sableuses, à l'Est de Gâvres, sont en voie de régularisation : les falaises de sable sont à pente vive sur les pointes rocheuses où elles s'ancrent. Les blockhaus de la dernière guerre, situés sur ces pointes, sont, pour la plupart, basculés sur la plage actuelle et battus par les hautes mers. Par contre, les anses semblent s'engraisser.

Ce sont donc les houles (ou les courants qui leur sont associés) qui jouent le principal rôle dans l'évolution du littoral mais dans la zone de calme que constituent l'estuaire et la rade, à l'abri du goulet de Port-Louis, les courants vont montrer à nouveau leur importance.

8 - 3. Les déplacements actuels de sédiments dans la zone estuarienne.

Avant toute chose, il faut signaler que les mesures actuelles de déplacements de sédiments dans l'estuaire du Blavet ne peuvent donner que des résultats très particuliers du fait de l'alimentation de cet estuaire en eau douce par une écluse-barrage. Seules, des particules en suspension, donc très fines, peuvent franchir cet obstacle.

Il a cependant paru intéressant d'étudier cette situation et d'essayer de voir, par l'examen des sédiments anciens, comment elle a pu modifier la sédimentation.

8 - 3 - 1. Renseignements fournis par les mesures directes

8 - 3 - 1 - 1. Les teneurs en matières en suspension dans les chenaux

Pendant les stations de mesures de courants (voir chapitre 5), des prises d'eau furent exécutées à la bouteille horizontale (OTTMANN, 1966) et les teneurs pondérales évaluées par un néphélomètre préalablement étalonné (voir annexe).

Les graphiques figurant les résultats des stations d'hydrodynamique en annexe comportent donc aussi une représentation de la variation de la charge solide en suspension au cours d'un cycle de marée.

A chaque heure, trois prélèvements réalisés à un mètre sous la surface, à mi-fond et à un mètre du fond ont permis de tracer des figurés représentatifs.

Le premier résultat que l'on puisse en tirer concerne la faiblesse des valeurs rencontrées.

Sur 300 mesures, trois seulement dépassent le gramme au litre, et encore les trouve-t-on pour des épaisseurs d'eau très faibles (de l'ordre de 2 mètres, voir mesures 16 et 17).

La teneur moyenne des échantillons oscille entre 30 et 50 milligrammes au litre, ce qui est très faible.

Le problème majeur posé est l'instant du maximum de ces teneurs en suspension : un maximum en flot semblerait indiquer une sédimentation par l'aval, un maximum en jusant, une sédimentation par l'amont.

En fait, pratiquement, toutes les mesures présentent ce phénomène de l'augmentation de la turbidité au fond en début de flot. Il est souvent, mais pas toujours, équilibré par de fortes valeurs en jusant.

En l'absence de multiples mesures simultanées permettant d'estimer quantitativement le débit solide en suspension, il a paru intéressant de relier dans chaque station, le moment de la marée où apparaissent les maxima de turbidité à la situation géographique de la station par rapport au centre d'équilibre hydrodynamique de l'estuaire (la lentille de mélange du chapitre 5).

C'est ainsi que l'on peut présenter le tableau suivant

Mesures présentant des maxima de turbidité en JUSANT	Situation hydrodynamique
1	Aval lentille
5	Lentille
6	En aval de la lentille
9	Lentille
13	En aval de la lentille
En début de FLOT	
11	En aval de la lentille
12	En aval de la lentille
Maxima à peu près équivalents en début de FLOT et fin de JUSANT	
7	Lentille
8	"
14	"
15	"
16	"
17	"

- Les formations citées comme étant en aval de la lentille sont du type "vertically homogeneous". -

La lentille ne paraît pas avoir, du moins directement, un rôle directeur dans la sédimentation ou la remise en mouvement des particules en suspension.

Au vu de ces résultats, le sens de la progression, vers l'amont ou l'aval, des sédiments en suspension ne paraît pas évident à priori.

Cependant, on peut noter :

- les eaux très chargées en début de flot sont toujours des eaux de très faible salinité, les eaux marines étant très claires,

- les stations situées en amont sont le siège en début de flot, de turbidités plus importantes que les stations d'aval.

C'est le phénomène de va et vient, si souvent décrit, et où il est bien difficile de définir le sens d'un bilan, les variations de vitesses de courant étant fort complexes du fait de la présence du phénomène estuarien.

8 - 3 - 1 - 2. Suspension près du fond et saltation

Les envasements spectaculaires de certaines souilles du Port de Commerce paraissent sans commune mesure avec les très faibles valeurs rencontrées lors des dosages de matières en suspension.

Immédiatement à la surface du sédiment, se produisent de nombreux phénomènes de remises en mouvement de particules très fines, suspension, saltation, formation de couche-crème, dont les champs d'action respectifs sont très difficiles à définir. Ces phénomènes sont très visibles sur les vasières où ils ont été maintes fois décrits (OTTMANN, 1965 - VERGER, 1968).

Il est bien difficile sur ces faibles épaisseurs d'eau d'estimer la part prise par le clapotis qui règne en certaines parties de l'estuaire (voir chapitre 3), et par le courant.

Pour évaluer cette influence du courant près du fond sur le mouvement des sédiments, un turbidimètre enregistreur fut placé entre l'Ile St-Michel et le port de Pêche avec sa cellule suspendue à une distance constante (20 centimètres) au-dessus du fond de vase (24/7/67, coefficient 81).

La figure 8-9 montre la reproduction de la bande d'enregistrement.

La saltation (ou suspension) à mi-jusant est très nette et très importante (parfois un gramme au litre) ; le même phénomène en flot est très peu caractérisé.

Le chapitre 4 a montré en effet que dans cette zone (la rade) chenal de flot et chenal de jusant s'individualisaient.

Ici, en chenal de jusant, et à proximité immédiate du fond, la turbidité maximum se réalise donc au moment du courant maximum.

Une mesure simultanée de courant et de turbidité, à 50 cm du fond, au même emplacement, le 18/8/67, par coefficient de 65, permettait de trouver à cette distance des valeurs rapides et irrégulières de mi-jusant, (environ 100 mg/l), correspondant à un courant maximum de 1 noeud.

Deux résultats peuvent être tirés de ces expériences :

- les valeurs de turbidité à proximité immédiate du fond sont incomparablement supérieures à celles mesurées en pleine eau,

- la relation avec l'hydrodynamique paraît plus évidente que pour les phénomènes de suspension.

Connaissant donc déjà les grandes lignes de l'hydrodynamique de l'estuaire, on peut tenter de voir si la répartition géographique des sédiments suit son influence.

FIG 8.9

Reproduction d'une bande
de turbidimètre enregistreur



Ce serait là une preuve indirecte de l'importance des phénomènes de charriage et saltation par rapport aux phénomènes de suspension.

8 - 3 - 1 - 3. Les renseignements fournis par
l'analyse des sédiments.

Une remarque préliminaire s'impose.

Dans un sable, l'analyse granulométrique est une représentation de la dimension des particules en mouvement très proche de la réalité.

Dans une vase, l'analyse texturale représente la répartition dimensionnelle des seules particules minérales après élimination de la gangue de matière organique et de colloïdes. En fait, dans la nature, ce sont des agglomérats, des flocons dont les dimensions sont très changeantes, qui sont transportés par l'eau.

De nombreux auteurs ont cependant découvert des relations entre la texture des sédiments fins et leur mode de transport hydraulique.

On se contentera ici de décrire la variation géographique des paramètres de la texture et de la comparer à des phénomènes hydrodynamiques connus.

8 - 3 - 1 - 3-1. Le diamètre moyen (v.fig.8-10)

Le chapitre 7 (voir carte 7-1) avait déjà signalé l'existence de bancs de sable encombrant le milieu du chenal en amont du Pont du Bonhomme. Plus en aval, le chenal présente la même disposition ; les diamètres moyens de ces sables sont les suivants :

- Banc du Hingair : 308 microns.
- Banc des Armes Gauloises : 341 microns.
- Banc St-Gwenaël : en amont 233 microns.
: en aval 177 microns.

Fig. 8-10

Répartition
géographique
du diamètre moyen.

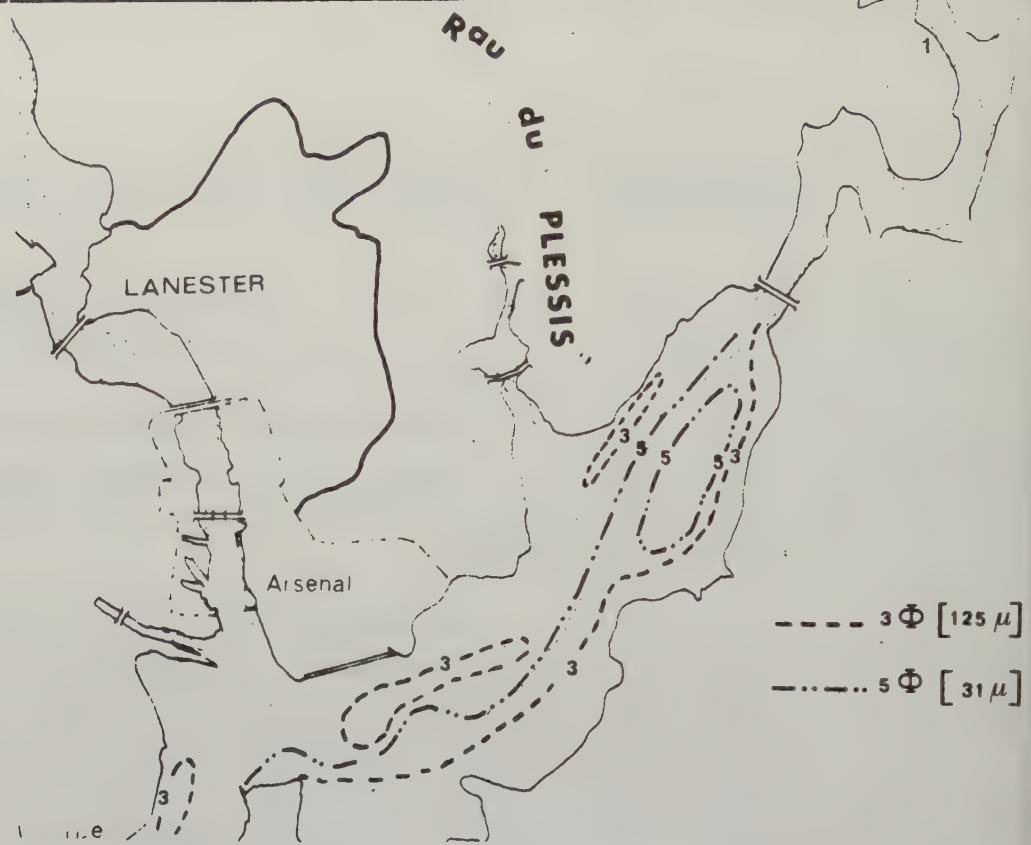


Fig. 8-11

Répartition
géographique
de l'écart-type



- Banc de Beg-ar-Men : en amont 354 microns.
 au centre 183 microns.
 en aval 165 microns.

En aval de chaque banc, la vase est très fine :

- 2 microns en aval du Banc du Hingair.
- 2,5 " " " Banc des Armes Gauloises.
- 31 " " " Banc de St-Gwénaél.
- 62 " " " Banc de Beg-ar-Men..

La vasière de la rive gauche en aval du Pont du Bonhomme présente une structure très caractéristique avec des vases fines centrales entourées de vases plus grossières et d'arènes près du rivage.

Par contre, la vasière de Kergroise présente une structure inverse avec un banc de sable central.

8 - 3 = 1 - 3-2. L'écart-type (voir figure 8-11)

La situation est ici très simple, les valeurs les plus élevées se trouvant concentrées au maximum de profondeur, c'est-à-dire dans le chenal pour la région située en aval du Pont du Bonhomme.

Plus l'épaisseur d'eau est grande et plus le sédiment est dispersé, plus les sources sont nombreuses, plus complexe est son origine.

8 - 3 - 1 - 3-3. Comparaison avec l'hydrologie

La diversité des apports dans le chenal, là où se combinent courants de mélange, courants de marée, courants de circulation littorale, est un résultat auquel on pouvait s'attendre.

L'interprétation des variations du diamètre moyen est plus délicate.

La brusque variation du diamètre des vases fines (quelques microns en amont du Pont de Bonhomme, plusieurs dizaines en aval), semble en bon accord avec la plus grande fréquence de formation de la lentille d'équilibre en amont du Pont qu'en aval.

Les bancs de sables fins discontinus, situés dans des sections rectilignes pourraient être associés à des positions de lentilles que l'on a vu elles-mêmes discontinues, dans l'espace et dans le temps.

La dimension des grains de ces bancs semble bien d'ailleurs, pour chaque banc, décroître de l'amont vers l'aval et la présence de vases fines, immédiatement en aval, fait songer aux théories de M. BERTHOIS (1964) attribuant à la lentille, un rôle de blocage brusque du transport sur le fond provenant d'amont.

L'élément hydrodynamique important serait alors l'accélération brutale de vitesse du courant qui charge la lentille en fin de jusant (voir mesures 16 et 17) et qui s'affaiblit par la suite, d'où la localisation en des endroits très précis de l'estuaire de ces fonds soumis à des vitesses rapides de jusant.

Dans cette description, le phénomène de transport n'est discontinu que dans le centre du chenal car les communications latérales sont toujours possibles.

Pour les vasières, les deux types de circulation de vaseuse d'estuaire (ROCHFORD, 1951) semblent ici représentés.

8 - 3 - 1 - 4. Renseignements fournis par la

géomorphologie et les sondages, -

L'analyse texturale met surtout en relief un mode de transport par les courants. Le chapitre 3 a montré que l'on pouvait s'attendre à trouver un clapot assez important dans la partie de l'estuaire soumise à des vents de Ouest Sud Ouest.

Ce clapot exerce une action de remise en suspension considérable sur les vasières facilitant l'action ultérieure des courants et la pointe de Sterbouest présente ainsi des flèches constituées d'accumulations de *Scrobicularia Crassatina* dégagées des vases environnantes. On trouve ainsi au Nord de cette pointe une flèche dont la courbure prend la direction Nord-Est et immédiatement au Sud une autre dont la courbure prend la direction Sud-Est, marquant ainsi que la circulation des courants dans deux vasières contigües est bien individualisée.

D'autre part, la tenue des souilles du Port de Commerce et du Port de Guerre atteste que les envasements se produisent de façon subite dans cette partie du bas estuaire, confirmant l'hypothèse de transports en masse près du fond.

En résumé, on peut interpréter la sédimentation de l'estuaire en le subdivisant en trois zones :

- une vallée étroite où se placent le plus souvent les formations d'équilibre estuarien, située en amont du Pont du Bonhomme. Les particules qui s'y déposent sont très fines et paraissent appartenir au domaine de la suspension.

- une zone plus large où se produisent quelquefois des phénomènes d'équilibre estuarien, située en aval du Pont du Bonhomme et en amont du débouché du Scorff où s'entremêlent phénomènes de transport sur le fond et par suspension.

- une zone, la rade, où les dépôts de matières en suspension paraissent insignifiants mais où, par contre, les transports au niveau du fond sont très importants.

L'existence d'un chenal de flot à l'Est de l'Île Saint-Michel et d'un chenal de jusant à l'Ouest (voir chapitre 4), et le fait que dans cette zone de courants de marée, les vitesses de flot au fond

sont supérieures à celles de jusant explique que l'on trouve des particules plus grossières à l'Est de l'Ile Saint-Michel qu'à l'Ouest.

Mais les phénomènes hydrauliques ne sont pas les seuls à entrer en ligne de compte dans la sédimentation d'un estuaire, la vie sous toutes ses formes influence grandement les divers processus sédimentaires.

8 - 4 . Renseignements fournis par les traces biologiques.

Cette étude fut entreprise uniquement à l'aide de carottages.

8 - 4 - 1. Faune et Flore

Une série de carottages en travers de l'estuaire, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 (carottages à perche et par gravité, voir carte 8-12) met en lumière, en aval du Pont du Bonhomme une certaine dissymétrie.

Sur la rive droite, on trouve sous 25 cm de vase noire des restes de plantes (C_3) alors que sur la rive gauche (C_1 et C_2), les traces de vie sont représentées par des coquilles de *Scrobicularia* et de *Cardium*.

Le carottage central, dans le chenal (C_4) met en relief l'existence de sable sous la vase actuelle azoïque. Cette vase actuelle est jaune sur 10 centimètres, témoignant de nombreux phénomènes d'oxydation.

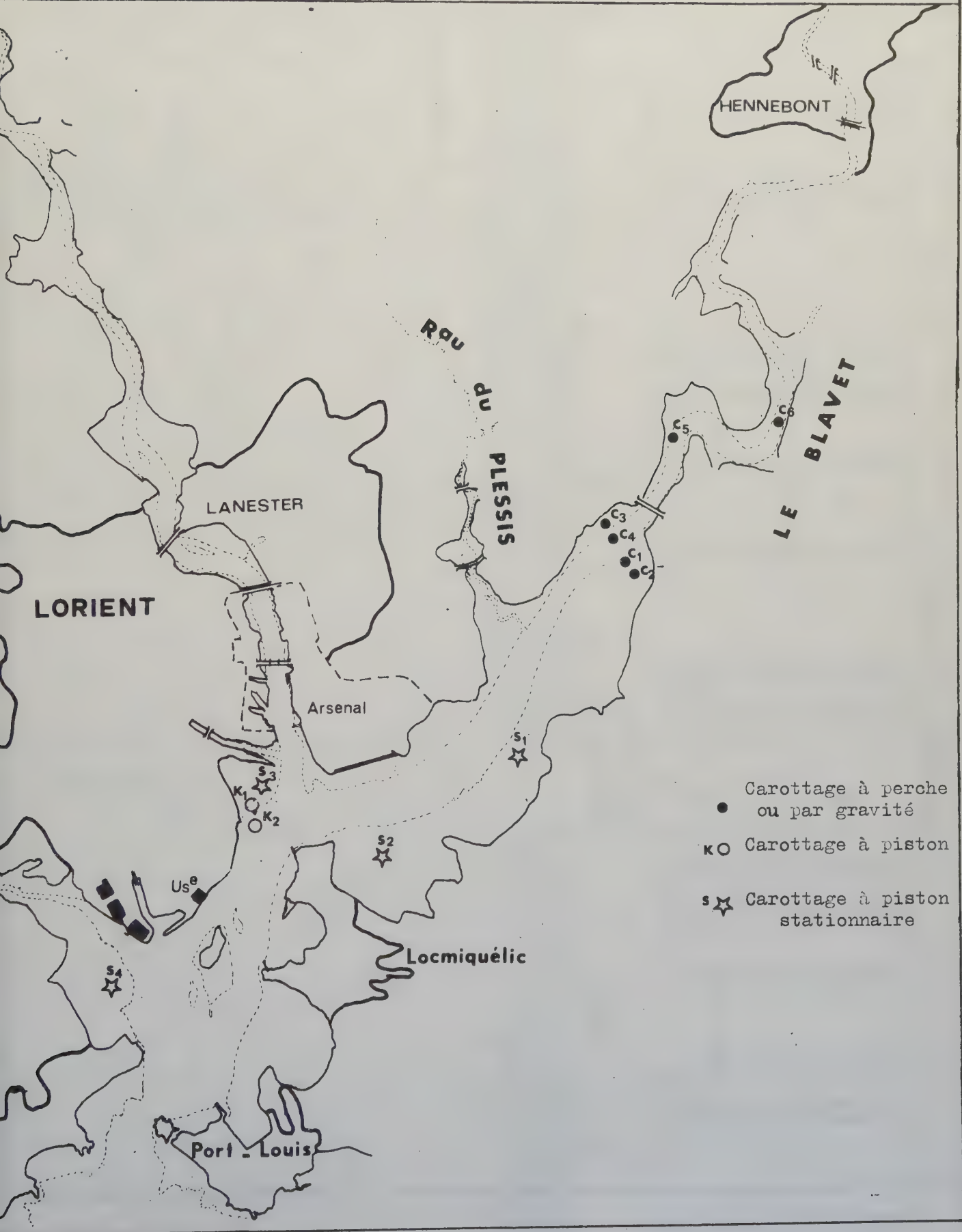
Ces plantes indéterminables se retrouvent en C_3 , plus en amont où ce sont de véritables feuilles qui sont incluses dans la vase.

Le chenal reste donc un domaine où peuvent s'appliquer raisonnablement les lois de l'hydraulique.

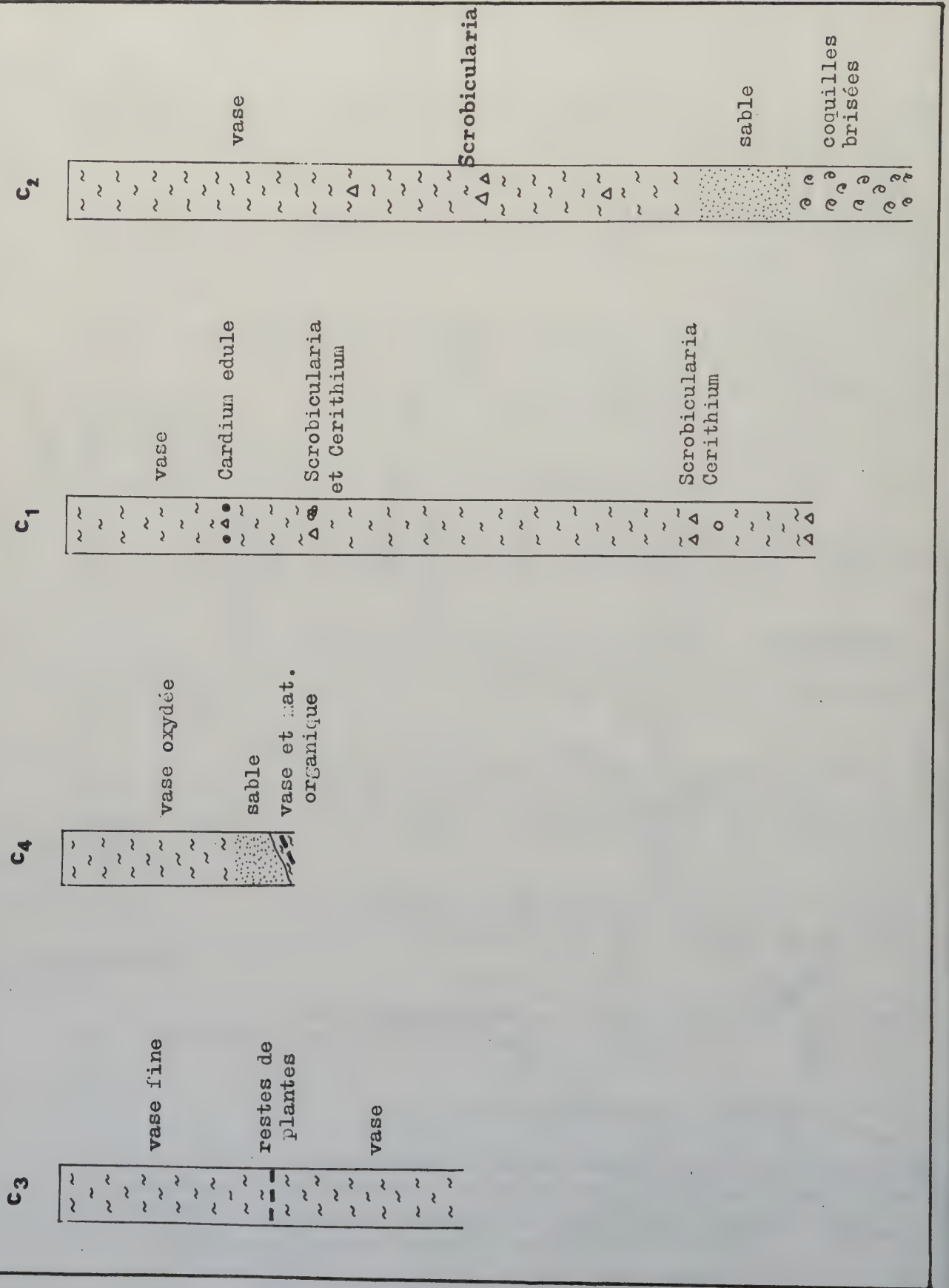
8 - 4 - 2. La sédimentation des vasières

4 carottages à piston stationnaire sur plateforme semi-submersible (OTTMANN, 1968) ont été réalisés sur des slikkes de vasières : 2 sur la rive droite d'une zone estuarienne (S_1 et S_2) et 2 sur la rive gauche de la rade (S_3 et S_4).

Emplacement des Carottages



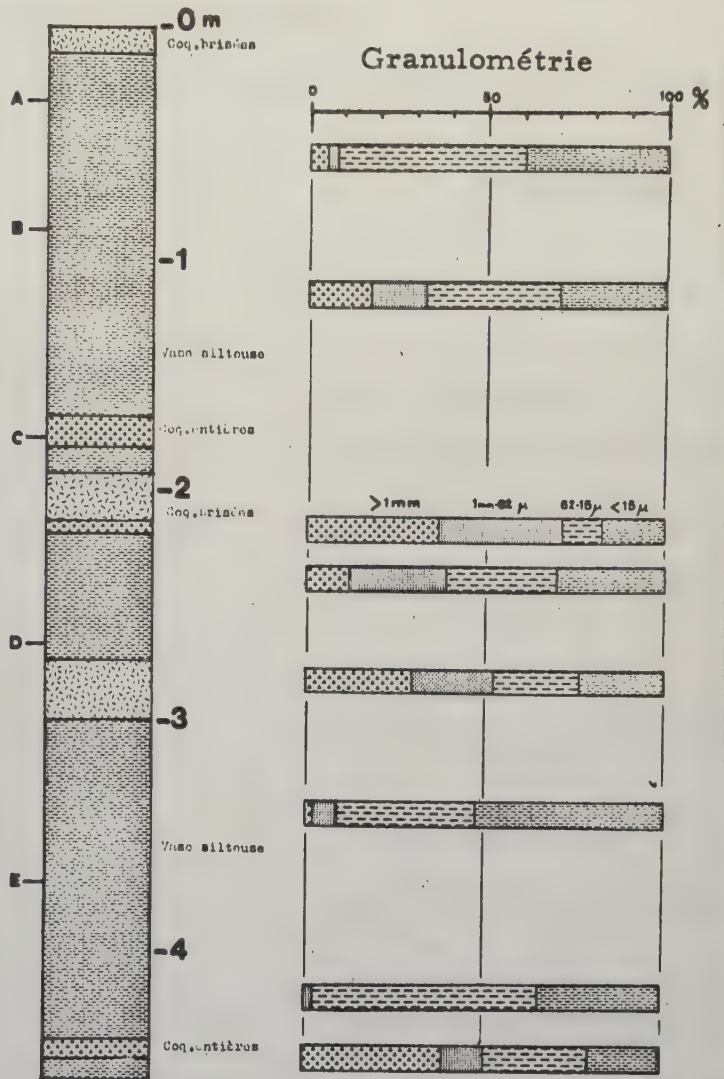
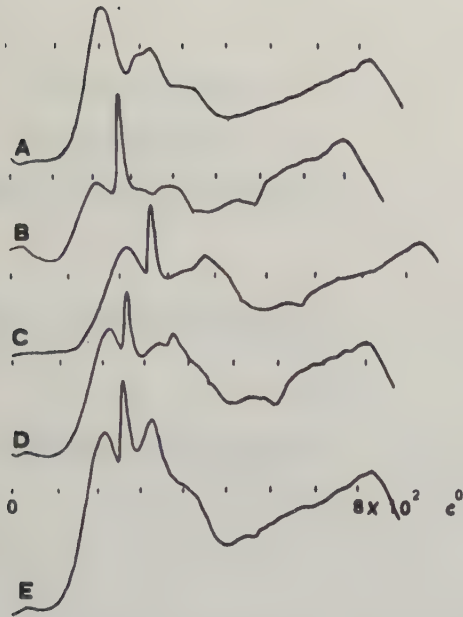
Description de Carottes



STERBOUEST
S₁

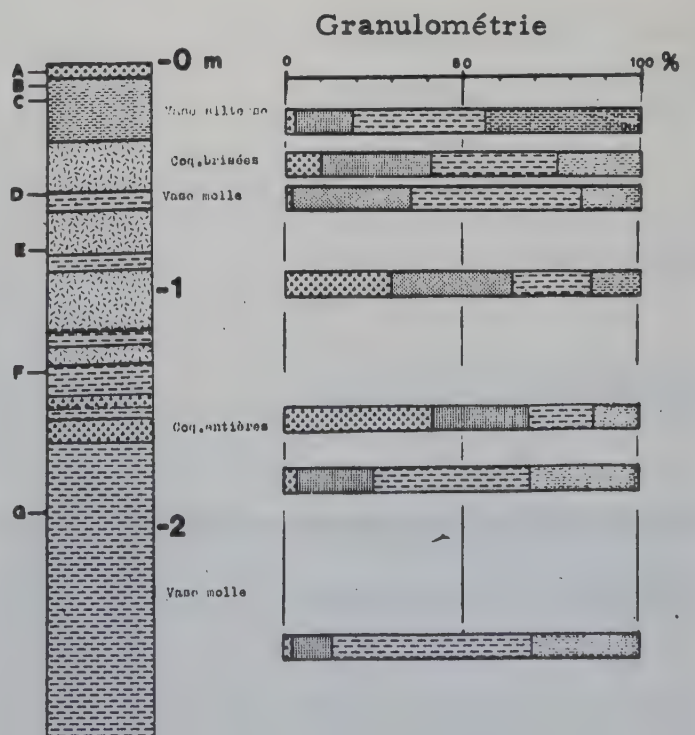
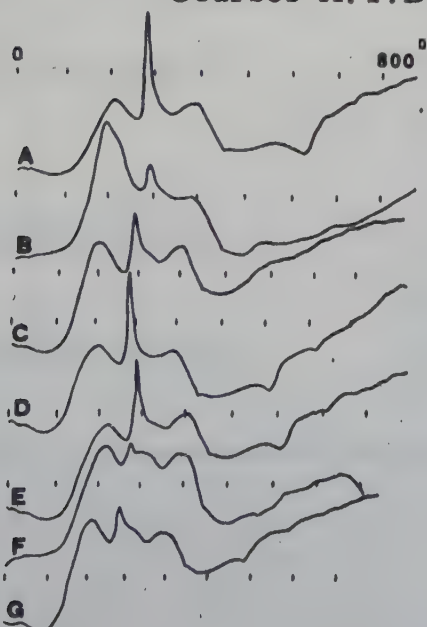
DESCRIPTION DE CAROTTES

Courbes A.T.D.



KERVERN
S₂

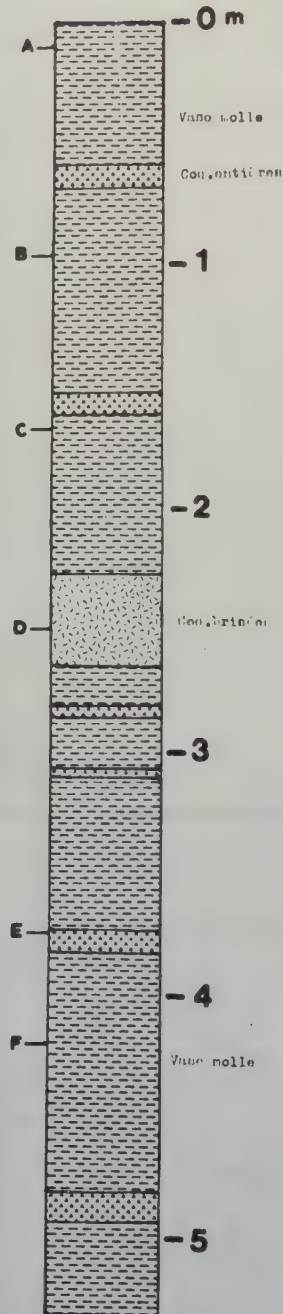
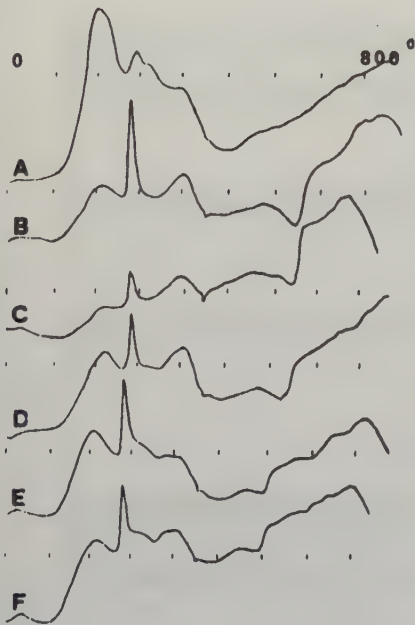
Courbes A.T.D.



Description de Carottes

KERGROISE
S₃

Courbes A. T. D.



Granulométrie

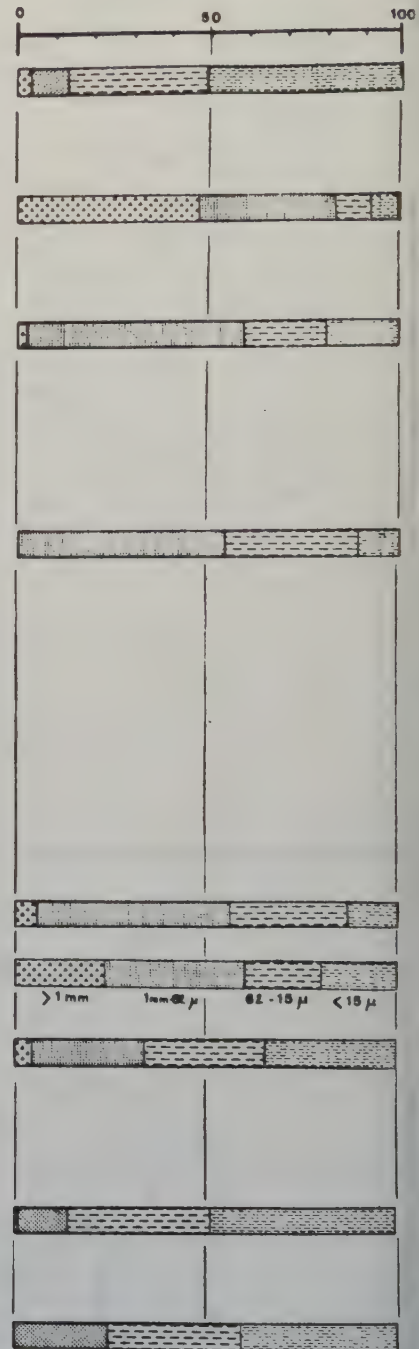
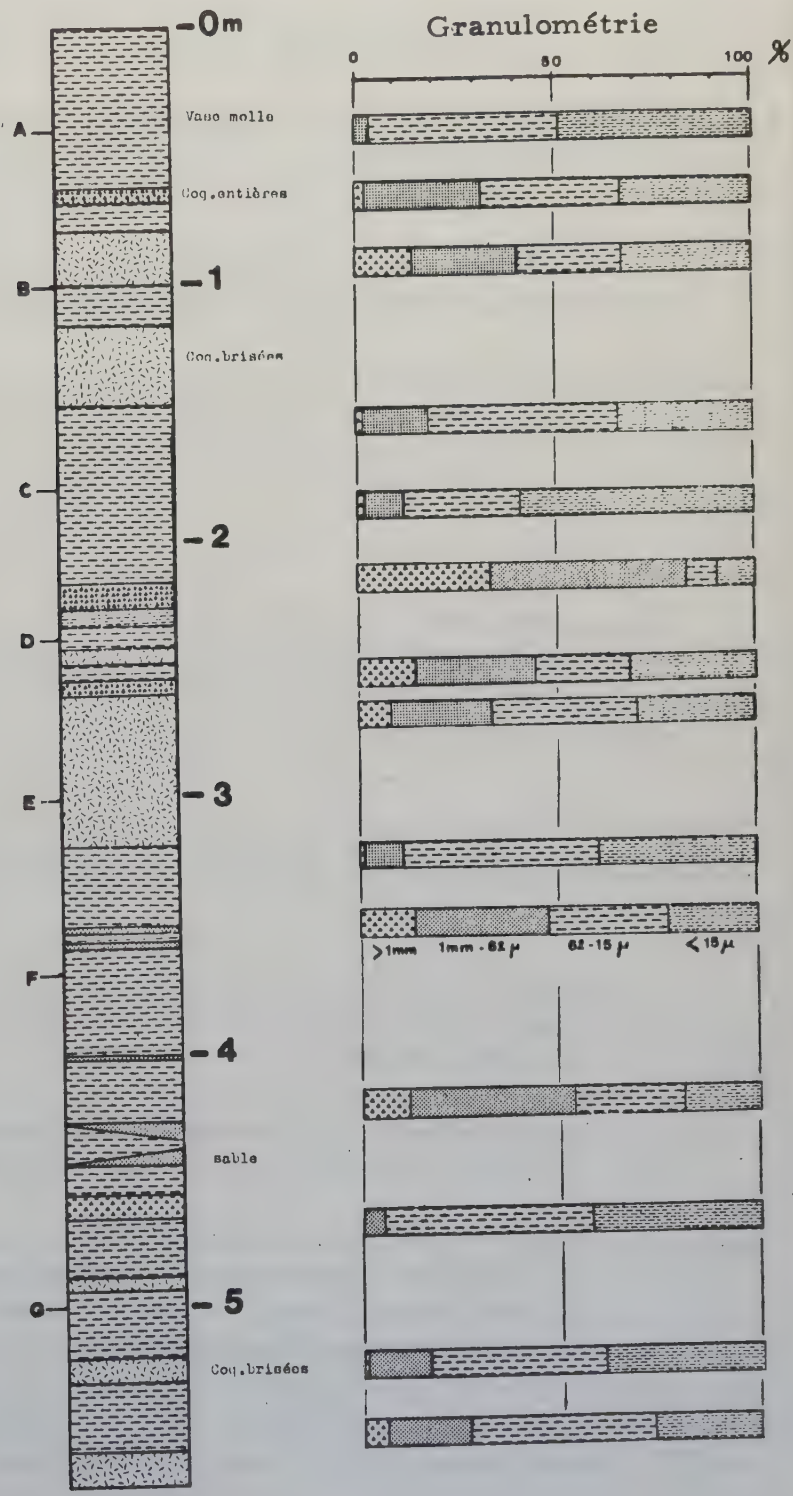
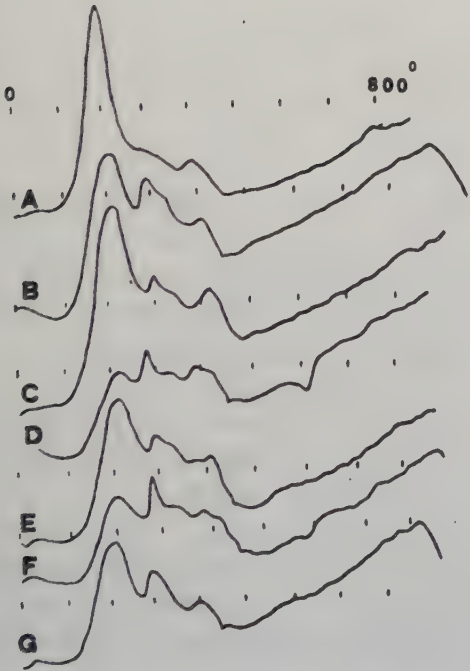


FIG 8.15

Description de Carottes

KERNEVEL
S₄

Courbes A.T.D.



En 8-13, 8-14, 8-15, parait l'effroyable complexité des séries sédimentaires lorsque s'interstratifient des débris coquilliers.

Deux remarques peuvent être pourtant faites. En gros, les pics d'analyse thermique différentielle exécutée sur des poids identiques diminuent d'amplitude vers le pied des carottes.

En gros aussi, (car il faut tenir compte de certains cycles difficiles à mettre en corrélation), la sédimentation très récente apparaît comme la plus riche en particules fines (< 15 microns).

Ces divers carottages posent donc le problème de la sédimentation passée et du sens de l'évolution de l'estuaire.

8 - 5. L'histoire de la sédimentation. -

8 - 5 - 1. Evolution actuelle

De nombreux témoignages s'accordent pour affirmer un recul du schorre sur la rive droite de l'estuaire, entre le Pont du Bonhomme et la rade. (ce recul serait de l'ordre de 200 mètres en certains endroits depuis 1920). Ce phénomène est confirmé par l'existence d'un ancien schorre érodé entre la slikke et le schorre actuel.

Des reculs identiques ont été constatés dans d'autres estuaires de la côte atlantique, le Lay en Vendée, la Laita entre le Finistère et le Morbihan. (RIVIERE, 1948, MELOU 1967).

La pente très faible des schorres rend ces phénomènes très spectaculaires mais la surélévation du niveau de la mer qui les provoque est certainement très faible et la cause première, très difficile à définir.

De toutes façons, l'influence de l'homme sur l'estuaire rend désormais difficile l'interprétation des processus naturels.

Cette influence de l'homme par le comblement des vasières, l'approfondissement des chenaux, la régularisation du débit des cours d'eaux, va dans le sens d'une homogénéisation des conditions physiques par élimination des conditions extrêmes.

Cette uniformisation se traduit du point de vue sédimentaire par une plus grande homogénéité des apports de vase actuels.

8 - 5 - 2. Le passé historique

Depuis sa création en 1666, le Port de Lorient a connu des problèmes d'entretien et a dû très vite faire construire "une machine à curer la rade".

Une barre, notamment, située au débouché du Scorff dans la Rade gênait considérablement le passage des navires.

"Entre la Rade de Pen Mané et le port de l'Orient il y a un banc de vase qui est assez étroit sur lequel il reste une brassée d'eau de basse mer aux plus grandes malines où la mer y monte de 18 pieds, après avoir passé (ledit) banc, on trouve trois brasses d'eau".

(Mémoires de M. Cébérer, 30 Juillet 1690).

En 1795, (République An III), Rio, Notaire à Port-Louis, dans un "Mémoire de la Commune de l'Orient sur les positions des côtes, Bayes, Rades, Ports et Havres", signale toujours son existence. Il semble qu'elle ait été draguée au début du XIX^e siècle et ne s'est jamais reformée depuis.

A priori, le seul élément hydraulique notable qui soit intervenu est la canalisation du Blavet (construction du Canal de Nantes à Brest) en 1828.

La régularisation du débit du Blavet aurait donc facilité l'écoulement en rade des eaux du Scorff. Elle aurait également modifié l'équilibre et la sédimentation de l'estuaire puisque le long banc de sable du chenal signalé par BEAUTEMPS-BEAUPRE en 1819 en aval du Pont du Bonhomme est à l'heure actuelle recouvert par 15 centimètres de vase (Carottage C₄).

Il faut pourtant signaler certaines "Observations sur le Mémoire du Sieur MACARY" datées de 1747 :

"La promesse que fait le Sr MACARY de mettre 25 pieds d'eau sur la barre au moyen de 8 que son travail occasionnera et de 17 que donnent les marées, est de ces promesses hasardées sans aucune connaissance du local puisque dans la plus grande Marée d'Equinoxe la mer ne monte qu'à 15 pieds".

Comme dans l'estuaire de la Seine (LE FLOCH, 1961) les travaux d'aménagement du littoral ont donc modifié considérablement le marnage dans l'estuaire le faisant passer pour les coefficients de 100, de 4,5 mètres en 1747 à 5,5 mètres actuellement.

L'effet probable en aura été un ralentissement des courants en rade (voir chapitre 4) et une augmentation de la sédimentation des particules fines.

Dans le domaine du littoral régional, le recul des côtes n'a pas toujours été le fait des éléments naturels. Les prélèvements de sable de la dernière guerre dans les dunes d'Etel ont souvent déséquilibré la ligne de rivage.

Plus anciennement, en 1795, le Mémoire du Notaire RIO, déjà cité, note que "sur cette côte on a trouvé depuis dix-huit mois une pierre coquillière très bonne pour faire de la chaux, ce qui a été d'une grande ressource pour les travaux du port et pour les manufactures de tannerie et savonnerie, et en général pour le public".

Ce texte est peut-être à rapprocher de la découverte de blocs de calcaires à Nummulites sur la plage du polygone de Gâvres. (DANGEARD 1924 a, 1929 b, DURAND 1960).

8 - 5 - 3. Le passé géologique.

Des études de sismique réflexion continue par petits fonds (DELANOË, GRASSY, GROVEL, 1968) ont montré l'existence d'un "paléolit" situé sous le cours du fleuve actuel. Cet ancien lit a été suivi depuis le Pont du Bonhomme jusqu'à la Citadelle de Port-Louis. Il passe à l'Ouest de l'Ile Saint-Michel.

Alors qu'en rade la sédimentation semble constituée de sables et de vases, dans la zone située plus en amont, des sondages effectués par les Ponts & Chaussées au Pont du Bonhomme, puis au Rohu, des études de sismique réfraction (SIG. LAGH) démontrent que sous la vase, le comblement du lit s'est effectué par des graviers et galets.

Ce résultat est à rapprocher de la présence en falaises sur la rive gauche de l'estuaire de formations Pliocènes constituées essentiellement de galets.

Les épaisseurs sont souvent importantes, 10 à 13 mètres de vase, 7 à 8 mètres de galets. La cote du rocher est le plus souvent à 20 mètres au dessous du zéro hydrographique, s'approfondissant légèrement en rade après le confluent du Scorff. Les fosses de la Citadelle (par.8-2) à -26 mètres sont donc tout simplement une portion de l'ancien lit du Blavet.

Plus au Sud, entre Groix et la côte, des reconnaissances au Sparker SIG ont montré que le comblement sédimentaire était très important (voir figure 8- 16). Le rocher est parfois à - 70 mètres, la cote du sable superficiel à 25 mètres ; l'ancien lit est donc très peu marqué. La seule affirmation possible est donc qu'à la sortie des passes de Lorient, le paléo-lit (c'est-à-dire le lit pré-Flandrien) est tracé dans des formations sédimentaires et non plus dans le rocher comme en amont.

8 - 6. CONCLUSION

L'origine des sédiments de l'estuaire apparaît maintenant plus clairement.

Un lit rocheux profond a été comblé lors de la transgression Flandrienne par la désagrégation sur place de formations sédimentaires environnantes :

- sables et galets dans la partie amont,
- sables dans la rade.

Les reliques de ces formations sédimentaires se trouvent encore en falaises entières sur la rive gauche du Blavet (à Sterbouest) et en lambeaux sur la rive droite (en face de Port-Louis, à Toulhars). L'âge qui leur est attribué est Pliocène surmontant du Cuisien (à Sterbouest) bien daté et riche en glauconie.

Un sondage (tarière à moteur du Laboratoire de Géologie Marine de Nantes) dans le ruisseau de Sterbouest, a permis de découvrir, sous un mètre de vase noire, quatre mètres d'argiles vertes à glauconie, sans stratification apparente et qui semblent un comblement.

Ce sont les lutites issues de ces matériaux anciens qui ont servi de matériau de base à la constitution de la vase d'où l'abondance de minéraux reconnus pour leur stabilité vis-à-vis de l'altération chimique continentale.

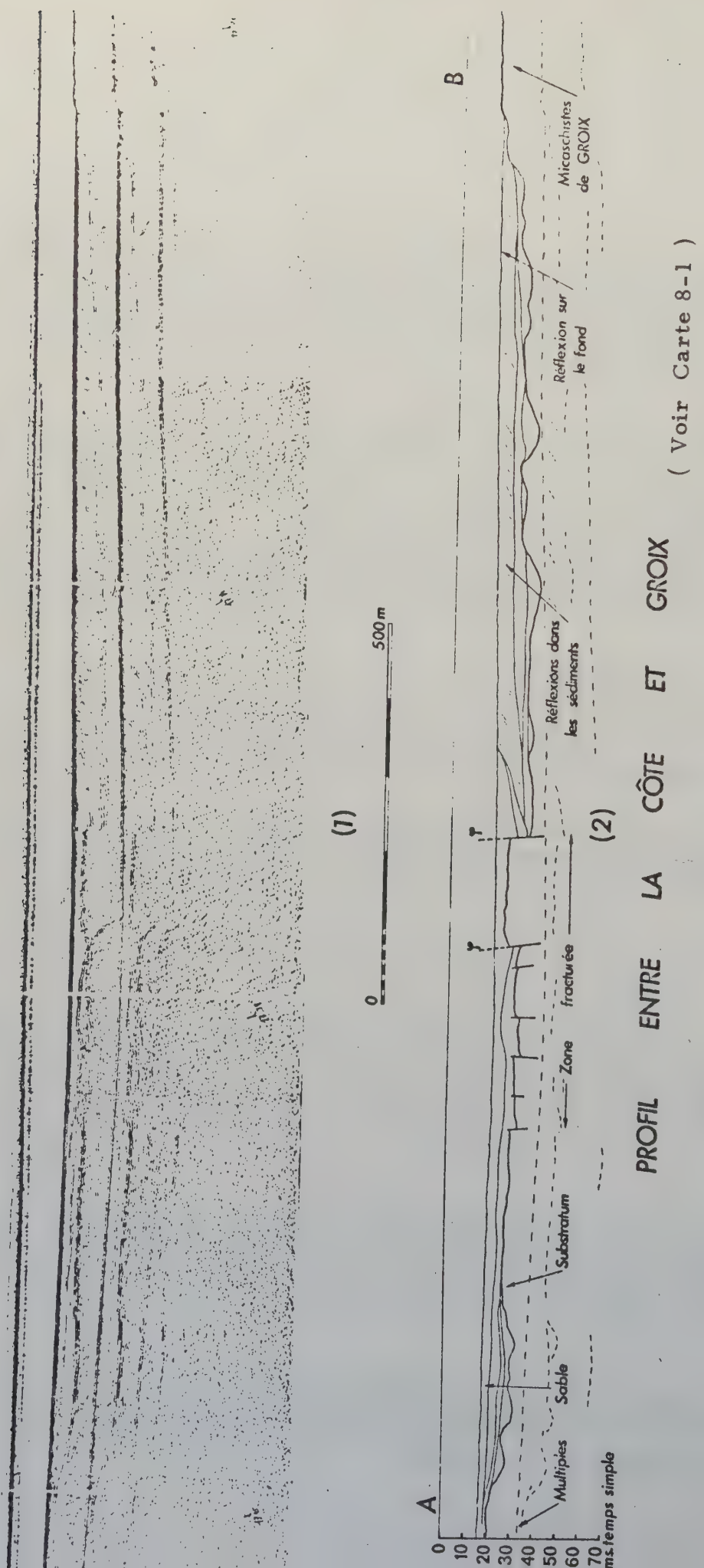


FIG 8.16

L'apport de matières organiques où les éléments cellulosiques et ligneux sont particulièrement nombreux s'expliquent par la constitution et l'érosion de schorres successifs d'une part, l'apport par les fleuves de débris de feuilles, d'autre part.

Cet apport de matière organique est donc en quelque sorte lié à une situation climatique déterminée. L'apport des fleuves en minéraux est lié, lui aussi, à la climatologie, puisque la constitution progressive d'un climat tempéré atlantique sur le bassin versant se traduit par une régression de l'altération chimique. Ceci se marque notamment par l'apparition dans les apports fluviaux de feldspaths alcalins.

La transgression marine, puis les travaux de l'homme par leur action sur le débit et l'amplitude de la marée, ont fait remonter les structures estuariennes s. str. de plus en plus vers l'amont. Ce faisant, la limite entre deux types de sédimentation estuarienne est, elle aussi, remontée vers le Nord.

On peut ainsi distinguer :

- Une zone de sédimentation estuarienne proprement dite :

Elle est située dans la région où se produisent le plus fréquemment les phénomènes d'équilibre (lentille) soit actuellement la zone en amont du Pont du Bonhomme.

La sédimentation y est caractérisée :

- dans le chenal, par des structures, liées aux diverses positions de la lentille et comprenant en amont un banc de sable, et en aval des vases très fines (argiles dimensionnelles). C'est une frontière entre un régime de transport par charriage et un régime de transport en suspension,

- dans les méandres et sur les slikkes par des lutites avec un régime de transport sur le fond (saltation).

- Une zone de sédimentation de bas-estuaire :

Actuellement, c'est la rade. Les courants de marée y sont prédominants et agissent sur des eaux presque totalement mélangées. Les transports près du fond dominant et les sédiments caractéristiques ont la dimension des lutites.

- Une zone de sédimentation intermédiaire, à faible fréquence de formation de lentille :

Actuellement, elle est comprise entre le Pont du Bonhomme et la Rade. Les vases fines en aval des bancs de sables y sont remplacées par des lutites.

- Enfin, les vasières :

Le clapot interne de l'estuaire y joue un rôle de remise en suspension, le courant reprend alors ces suspensions et les répartit de façon circulaire.

Entre vasières, zone intermédiaire et bas estuaire, les sédiments les plus nombreux (les lutites) présentent une grande homogénéité (voir chapitre 7) ; il n'y a donc pas de solution de continuité du point de vue de la sédimentation entre ces différentes zones.

Par contre, les sédiments très fins que l'on rencontre dans la zone estuarienne s.str. sont pratiquement absents de toutes les zones situées en aval. On ne les retrouve que dans la Fosse de la Citadelle et peut-être, très au large et vers l'Ouest, en Fosse du Talud.

Ce phénomène apparaît encore plus frappant lorsque l'on constate l'abondance des formations argileuses sédimentaires en bordure de la zone intermédiaire et la très faible teneur en argiles des sédiments de cette zone.

Il faut qu'il y ait eu mise en suspension et sortie de l'estuaire. La formation vaseuse découverte par la sismique dans la Fosse de la Citadelle indique bien d'ailleurs qu'il y a actuellement, sortie de sédiments en suspension.

Ces sorties sont probablement très soudaines car la dynamique de l'estuaire (chapitre 5) a montré comment la circulation littorale influait sur l'équilibre de l'estuaire et comment par temps d'Ouest, les eaux fluviales, riches en matières en suspension, avaient tendance à s'accumuler.

Après un fort temps d'Ouest, par vent faible ou d'Est, courant fluvial (gros fait des précipitations) et courant de pente rompent l'équilibre, entraînant au large, en suspension, les particules les plus fines que l'érosion des pluies a arrachées au bassin versant.

Les pêcheurs côtiers ont remarqué le fait que chaque période brusque de calme ou de vent d'Est amenait sur le littoral à l'Ouest du goulet de Port-Louis, des eaux très chargées en suspension.

La circulation littorale influe davantage de cette façon sur la sédimentation de l'estuaire que par son propre apport de sédiments.

La houle elle-même ne fait pénétrer que très localement des sédiments sableux. Par contre elle fait transiter vers l'Ouest des sables fins dont la migration est stoppée par le débouché de l'estuaire. A l'Est de l'estuaire, c'est une migration d'autres sables qui reprend. Enfin, entre l'île de Groix et la côte, le transport vers l'Ouest des sédiments fins est net et très lié à la circulation littorale.

CONCLUSIONS

Avant de faire une synthèse générale de cette étude il convient de passer en revue les divers points où des résultats semblent avoir été acquis.

1- Etudes de courants.

Le chapitre 2 présente la mise au point d'une méthode simple et pratique d'étude de la circulation littorale.

En partant d'un courant total mesuré il est montré que l'on peut en faire l'analyse c'est à dire extraire chacun des composants (courant de marée, courant de dérive, courant de pente) à la fois dans les plans vertical et horizontal. Il est alors possible d'en refaire la synthèse c'est à dire recréer une image de la circulation littorale complète.

2- Etude de la houle.

Une méthode de prévision a été utilisée " à posteriori " pour tenter de relier une houle mesurée à la côte à la circulation atmosphérique.

L'intérêt de cette méthode pour l'ingénieur réside en la possibilité de réduire considérablement la durée des enregistrements de houle " in situ ", toujours très coûteux, et d'établir des estimations de houles décennales et centenaires en passant par le biais des calculs sur cartes météorologiques.

L'imperfection (toute relative d'ailleurs, car les houles maximums ne peuvent être omises) de cette méthode tient au fait que la prévision de houle après réfraction est un domaine encore inexploré.

Ce sont les premières mesures de houle exécutées sur le littoral Sud de la Bretagne qui ont permis de procéder à ces toutes premières recherches.

3- Etude de la circulation estuarienne.

La découverte que " two-layered system " et " lentille immobile " recouvraient la même réalité, " la convection par gravité " est d'une importance capitale pour l'étude de la pollution.

En effet le chapitre 6 montre que les estuaires " homogènes sur le plan vertical ", " partiellement mélangés ", en deux couches ou " lentilles immobiles " que la majorité des auteurs pensaient être distincts sont probablement les phases successives d'amont en aval d'un même phénomène estuarien.

En effet dans l'estuaire étudié, étroit, si l'on s'élève successivement et suffisamment de l'aval vers l'amont on retrouve toujours la succession de ces trois formations. Or le phénomène direct qui explique cette succession dans les estuaires étroits est un phénomène physique général. Tous les estuaires étroits doivent donc présenter cette succession et les querelles de divers auteurs tiennent donc au fait qu'ils étudient des portions d'estuaire différemment situées dans le sens longitudinal.

Il convient donc d'adapter un système d'unité commun à tous les estuaires. Le chapitre 6 démontre que le nombre de Rayleigh est d'une application encore plus générale que ne le soupçonnaient ses premiers utilisateurs puisqu'il s'applique avec fruit non seulement à l'étude d'un phénomène stationnaire mais encore à celle d'un phénomène qui n'est pas.

Ce nombre caractérise un estuaire à la fois sur le plan hydrodynamique (marée, débits, différence de salinité entre eau douce et eau salée) et sur le plan géomorphologique (largeur, profondeur, longueur, pente). Dans une étude de pollution la détermination ou l'estimation des valeurs que peut prendre Ra pour un estuaire déterminé peut seule permettre la situation de la zone où le produit nocif dissous dans l'eau douce se diluera dans l'eau de mer.

Dans une étude de dragages portuaires, c'est la modification des facteurs géomorphologiques de Ra qui permettra de prévoir les modifications hydrodynamiques occasionnées par un creusement de souille, un approfondissement de chenal...

4- L'estuaire et l'environnement (chapitres 5 et 6)

La découverte la plus importante est l'influence de la circulation littorale sur la circulation estuarienne.

Pour bien des auteurs, l'estuaire est le lieu d'équilibre entre la poussée du fleuve d'une part et la poussée de la marée d'autre part. Les mouvements d'eaux de mer semblent ainsi limités à l'action des courants de marée.

En fait il n'en est rien - courants de dérive et courants de pente ont une influence moindre qu'en mer ouverte mais importante cependant sur l'équilibre estuarien.

Dans un climat atlantique une situation dépressionnaire créera à la fois des courants de dérive renforçant la dominante du flot dans l'estuaire, et des précipitations sur le bassin versant renforçant la poussée du fleuve. Il y a donc formation d'un nouvel équilibre avec un volume d'eau inclus dans l'estuaire supérieur à la normale.

Précisément, le retour à la normale se traduira par une prédominance pendant un temps très bref de courants de jusant. Pendant ces courtes périodes les courants de jusant atteignent des valeurs très importantes.

Les périodes des vents d'aval verront donc l'estuaire " se remplir ", les périodes de vent d'amont le verront " se vider ".

L'estuaire est en soi une grande station météorologique.

5- Sédimentologie descriptive.(chapitre 7)

L'étude sédimentologique a été menée de façon très classique. L'interprétation minéralogique de l'analyse chimique des sédiments fins a cependant été étudiée tout particulièrement. Elle permet d'établir un portrait de ce sédiment, la vase d'estuaire, souvent décrit en termes très vagues.

L'analyse thermique différentielle, semi-quantitative, a été très employée comme méthode d'analyse. Elle a permis de mettre en évidence des phénomènes de retard de flammes et d'identifier des pics de matière organique, non décrits jusqu'à ce jour.

6- Sédimentologie dynamique. (chapitre 8)

Le rôle de la lentille d'équilibre au point de vue sédimentologique, semble assez analogue à celui qu'elle joue sur la Loire (Berthois 1964) c'est à dire celui d 'un tamis : les particules fines en suspension franchissent l'obstacle mais les particules grossière sont arrêtées. Ce schéma paraît très satisfaisant; il ne tient cependant pas compte du rôle joué par les vasières où dans l'estuaire proprement dit le déplacement de sédiments semble franchement dirigé vers l'aval.

Dans la lentille , les courants résiduels au fond paraissent dirigés vers l'amont.

Mais ce ne sont là que les composantes horizontales de mouvements circulaires. Les sédiments transportés vers l'amont sur une courte distance avant de se déposer sont, en fait, issus des couches de surface qui coulent vers l'aval.

Dans la zone estuarienne, le déplacement des sédiments est donc dirigé vers la mer.

Dans le bas estuaire la situation est moins nette.

Le phénomène de sédimentation le plus important est constitué par l'existence de transports au ras du fond.

Les envasements notés par les ingénieurs du Port sont toujours subits et importants.

Il semble logique de les attribuer aux courants violents de jusant des courtes périodes de vent d'amont décrites plus haut. C'est, en effet, le seul phénomène brutal rencontré dans cette étude d'estuaire.

La sédimentologie grossière venue de la mer est ici gênée par la configuration du goulet de Port Louis, qui permet au contraire la sortie de vases en suspension.

Cette sortie de sédiments vers la mer est en résumé liée à un phénomène spécifique du climat atlantique qui règne sur tout le bassin versant

Il est permis de penser que sous d'autres climats

le phénomène de sédimentation pourrait se présenter autrement.

CONCLUSION GENERALE

Le titre de cet ouvrage annonçait une étude " d'estuaire dans son environnement ", mais lorsqu'on voit à quel point la physiologie d'un estuaire est liée à ses échanges entre hydrosphère, atmosphère, lithosphère on peut se demander s'il aurait été possible de conduire autrement cette recherche.

Il faut toutefois se garder de considérer un estuaire comme subissant passivement l'influence des forces extérieures.

Si dans un régime atlantique un fleuve côtier est lié à la climatologie à la fois par la pluviométrie de son bassin versant et la circulation de la mer où il se jette, il semble exercer sur cette climatologie une action en retour non négligeable.

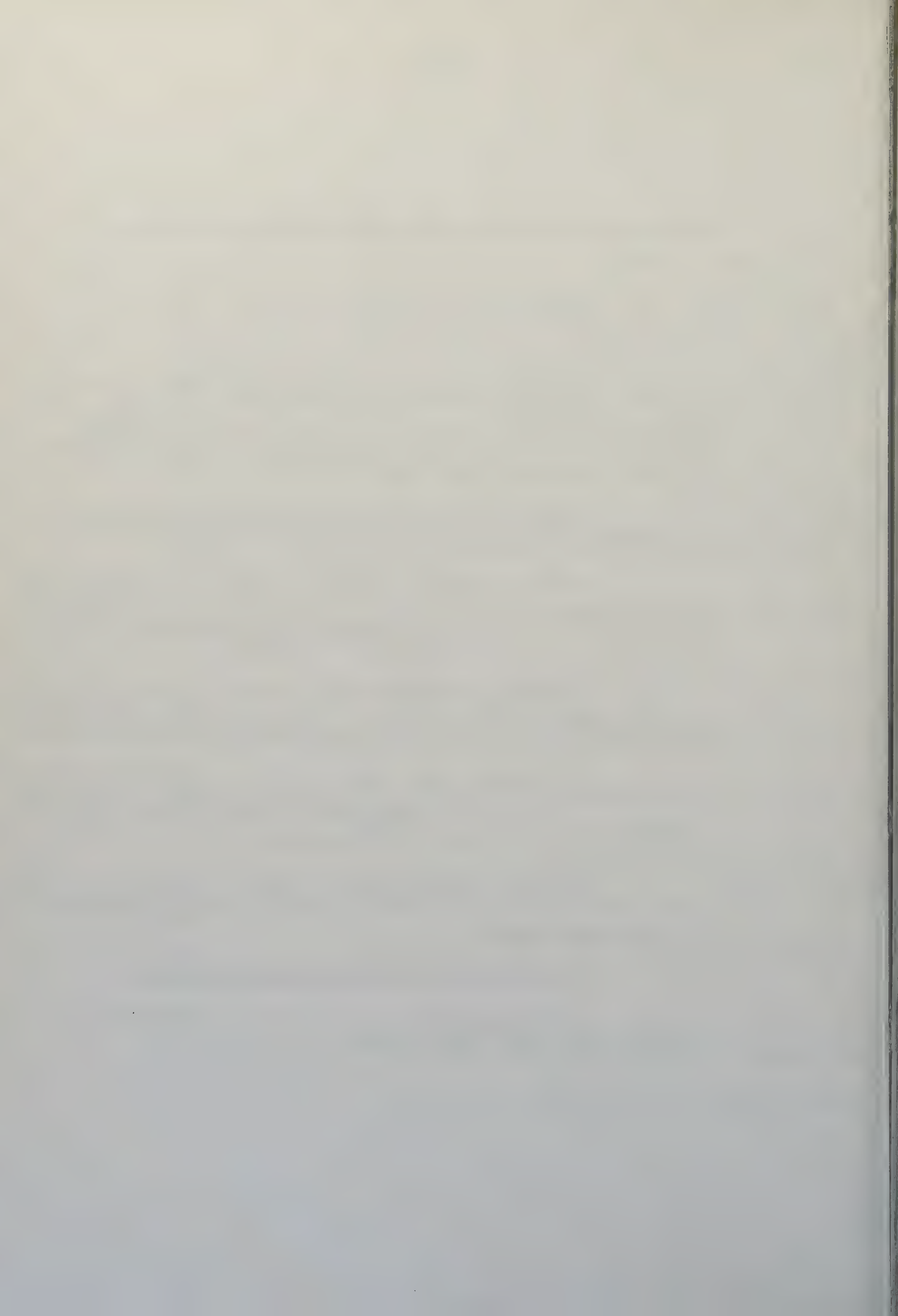
Echangeur de masses d'eaux l'estuaire est par là même un grand échangeur de température. C'est donc aussi un échangeur de masses d'air et la morphologie de sa vallée facilite le phénomène.

Les habitants d'une région bordant un estuaire se vantent souvent de leur micro-climat et ils ont souvent raison. De même que l'estuaire reproduit en les amplifiant les variations climatologiques il semble agir sur le climat en l'adoucissant.

L'humeur des habitants s'y modèle et finalement on s'aperçoit que c'est la douceur du climat humain qui rend si attachantes les zones estuariennes.

L'environnement n'a de sens que pour l'homme.

Car le chercheur n'est rien devant sa recherche et la Recherche n'est rien sans l'Homme.



LISTE DES FIGURES

FIG 1-1 Cadre général de l'étude. Noms de lieux cités.

1-2 Carte géologique.

2-1 Carte de situation des points de mesures de courants.

2-2 Schéma de mouillage de courantographe (au fond).

2-3 Schéma de mouillage de courantographe (en surface).

2-4 Hauteurs des pleines mers à Groix.

2-5 Répartition géographique des zones météorologiques citées dans le texte.

2-6 Variation en un point des courants provoqués par le vent durant 14 jours.

2-7 Relation entre vitesse du vent et vitesse des courants de dérive.

2-8 Aspect des composantes du courant de marée.

2-9 Relation entre vitesse du courant et coefficient de marée.

2-10 Schémas de circulation littorale.

2-11 Courants au fond et en surface le même jour.

2-12 Composantes Sud-Nord et Ouest-Est de courants de fond.

2-13 Mise en évidence, près du fond, de la présence d'un courant de pente.

2-14 Composantes du courant de pente au fond.

- 2-15 Champ vertical des courants.
- 2-16 Profondeur d'influence du frottement et thermocline.
- 3-1 Situation du point de mouillage du houlographe.
- 3-2 Variation des deux périodes principales de la houle en un point durant deux mois de printemps.
- 3-3 Hauteurs de houle en un point durant deux mois de printemps.
- 3-4 Directions de la houle à Belle-Ile durant la même période.
- 3-5 Histogramme des hauteurs maximales de la houle en un point durant deux mois.
- 3-5 Histogramme des périodes fondamentales de la houle bis en un point durant deux mois.
- 3-6 Houle et hasard mathématique.
- 3-7 Table de corrélation entre périodes et amplitudes maximales.
- 3-8 Corrélation entre hauteurs des houles et probabilité d'occurrence.
- 3-9 Probabilité d'occurrence d'une houle de hauteur maximale donnée en un point.
- 3-10 Importance de la réfraction.
- 3-11 Orthogonales et plan de vagues d'une houle Nord-Ouest.
- 3-12 Orthogonales et plan de vagues d'une houle Sud-Ouest.
- 3-13 Orthogonales et plan de vagues d'une houle Ouest-Sud-Ouest.
- 3-14 Influence du courant sur la houle.
- 3-15 Hauteurs significatives théoriques et mesurées de houle réfractée.

- 3-16 Situations météorologiques des 23 et 24 Mars 1968.
- 3-17 Etude théorique de la tempête du 23 Mars 1968.
- 4-1 Emplacements de points de mesures hydrologiques dans le "bas-estuaire".
- 4-2 Mesures de courant exécutées dans le bas-estuaire par le Service Hydrographique.
- 4-3 Vitesses maximales du courant de flot.
- 5-1 Estuaire du Blavet : points de mesures hydrologiques.
- 5-2 Profil en long de l'estuaire.
- 5-3 Formation d'une halocline.
- 5-4 Passage d'une poche d'eau plus douce.
- 5-5 Différences latérales.
- 5-6 Allure générale du phénomène de mélange.
- 5-7 Mise en évidence de la forme lenticulaire de la structure hydrodynamique de mélange.
- 5-8 Courants de flot et courants de couche profonde.
- 5-9 Etude physique de la lentille.
- 5-10 Etude chimique de la lentille.
- 5-11 Etude bactériologique de la lentille.
- 5-12 Salinité moyenne sur une marée.
- 5-13 Champ vertical du courant créé par le mélange des eaux douces et salées.
- 5-14 Différence entre courants résiduels mesurés et théoriques.
- 5-15 Illustration de l'influence sur l'estuaire du mouvement des masses d'eau du large.

- 6-1 Bassin versant du Scorff.
- 6-2 Profil en long du Scorff.
- 6-3 Débits moyens mensuels du Scorff.
- 6-4 Bassin versant et profil en long du Blavet.
- 6-5 Débits moyens mensuels du Blavet.
- 6-6 Relations Météorologie - Hydrologie Marine - Hydrologie Continentale.
- 7-1 Carte des régions sédimentologiques.
- 7-2 Teneurs en eau des vases : répartition des prélèvements.
- 7-3 Variation géographique du rapport C/N
- 7-4 Relation Carbone-Azote.
- 7-5 Rapport C/N à l'embouchure d'un ruisseau.
- 7-6 Essais sur la composition de la matière organique: tableau de résultats.
- 7-7 Courbes d'Analyse Thermique Différentielle des divers constituants de la Matière Organique.
- 7-8 Analyse Thermique Différentielle: Courbes de divers échantillons de l'estuaire.
- 7-9 Renforcement du deuxième pic de matière organique d'aval en amont.
- 7-10 Renforcement du deuxième pic de matière organique du chenal vers le schorre.
- 7-11 Liaisons Matière Organique - Matière Minérale.
- 7-12 Tableau d'analyse minéralogique aux rayons X d'échantillons de vase de l'estuaire.
- 7-13 Tableau d'analyse diffractométrique des argiles.

- 7-14 Tableau d'analyses chimiques.
- 7-15 Analyse texturale : emplacements des prélèvements.
- 7-16 Répartition des diamètres moyens et de l'asymétrie des échantillons.
- 7-17 Diamètre moyen en fonction de l'asymétrie.
- 7-18 Diamètre moyen en fonction de l'écart-type.
- 7-19 Répartition générale des écarts-types.
- 7-20 Répartition des écarts-types des sables et des vases
- 7-21 Courbes de fréquences types.
- 7-22 Courbes cumulatives en ordonnées de probabilités.
- 8-1 Le paléo-lit du Blavet.
- 8-2 La Fosse du Talud: hydrographie et sédimentologie.
- 8-3 Transmission de la lumière à 1 mètre du fond en Fosse du Talud.
- 8-4 Coupes de vase en Fosse du Talud.
- 8-5 Sédiments de la zone des passes: emplacements et répartition des paramètres texturaux.
- 8-6 Enregistrement de sismique en Fosse de la Citadelle.
- 8-7 Etude des sédiments de plages. Emplacement des prélèvements.
- 8-8 Analyse texturale des sables de plages.
- 8-9 Remise en suspension à mi-jusant: reproduction d'une bande de turbidimètre enregistreur.
- 8-10 Répartition géographique du diamètre moyen des vases de l'estuaire.

8-11 Répartition géographique de l'écart-type, des vases de l'estuaire.

8-12 Emplacement des carottages.

8-12 Description de carottes.
bis

8-13 Description des carottes S1 et S2.

8-14 Description de la carotte S3.

8-15 Description de la carotte S4.

8-16 Profil sismique entre la côte et Groix.
